RADIO

i trasformatori

teoria - progetto - pratica costruttiva - prove e misure - autotrasformatori - minimo costo



CMR 21

Dr. Ing. E. Baldoni

Editrice "RADIO INDUSTRIA,, Viale Beatrice d'Este, 24

MILANO 322

Dott. Ing. Enrico Baldoni

I TRASFORMATORI
TIPO RADIO
E SIMILI

teoria generale
calcolo teorico
progettazione
pratica costruttiva
prove e misure
autotrasformatori
il problema
del minimo costo

editrice "RADIO INDUSTRIA"
MILANO (322)
Viale Beatrice d'Este, 24 - tel. 55.41.37 - 58.98.85

Finito di stampare li 5 - 2 - 1955 presso la
"Tipografia Industriale Milanese,, della "RADIO INDUSTRIA,, - MILANO - Via Salasco, 20

S O M M A R I O

UNITÀ DI MISURE NORMALMENTE USATE NELLE FORMULE DEL LIBRO

Grandezza	Simbolo	Unità di misura
Tensione elettrica	V	volt
Forza elettromotrice	E	volt
Corrente elettrica	I	ampère
Corrente elettrica specifica	J	amp./mm^2
Potenza reale	W	watt
Potenza reattiva	VAR	var
Potenza apparente	VA	volt-ampère
Resistenza elettrica	R	ohm
Resistività o resist. specifica	ϱ	ohm/m/mm^2
Frequenza	f	hertz
Sfasamento	φ	gradi sessages.
Flusso magnetico	Φ	linee
Induzione magnetica	B	linee/cm^2
Lunghezza	L	cm *
Superficie (circuiti magnetici)	s	cm^2
Superficie (sezione conduttori)	S	mm^2 **
Volume	Vl, vl	cm^3
Peso	P	grammi

Nota generale:

Di tutte le grandezze alternative sinusoidali si intende sempre considerato il valore efficace, eccezion fatta per l'induzione magnetica di cui è sempre considerato il valore massimo.

* *In qualche formula per comodità di calcolo, è usato come unità di misura il metro. Questa particolare scelta è però chiaramente segnalata di volta in volta.*

** *Talora, per omogeneità, anche il cm^2 (vedi osservazione precedente).*

ELENCO DEI SIMBOLI USATI NEL PRESENTE LIBRO E LORO SIGNIFICATO

(in ordine alfabetico)

A	larghezza finestra lamierino
Ar	area in genere
B	altezza finestra lamierino
B	induzione magnetica
C	costante in senso generico
C_t	costo totale di un trasf.
C_{fe}	costo unitario del ferro
C_{cu}	costo unitario del rame
E	forza elettromotrice
E_e	f.m.e unitaria (in 1 spira)
f	frequenza
H	spessore pacco lamiere
I	corrente elettrica
I_m	corrente magnetizzante
I_p	corrente primaria
I_s	corrente secondaria
I_v	corrente a vuoto
J	corrente specifica
k	coefficiente generico
k_f	coeff. riempim. finestra
k_{fe}	coeff. stipam. lamierini
k_p	coeff. ingombro del primario (per J cost.)
k'_p	coeff. ingombro del primario (per W'_p cost.)
L	lunghezza in genere
L	larghezza del nucleo
L_m	lunghezza spira media
N	numero di spire
N/V	spire per volt
P	peso in genere
P_{cu}	peso del rame
P_{fe}	peso del ferro
R	resistenza elettrica
s_{fe}	sezione netta circuito magnetico
s'_{fe}	sezione lorda circuito magnetico
S	sezione netta conduttore
S_{cu}	sez. netta totale di uno o più avvolgimenti
S_f	superficie netta finestra
T	periodo
V	tensione elettrica
V_p	tensione primaria
V_s	tensione secondaria
V/N	volt per spira
VA	potenza elettrica appar.
VA'	pot. virtuale (geometrica)
VA_e	pot. app. unit. (in 1 spira)
VA_p	pot. apparente primaria
VA_s	pot. apparente secondaria
VAR	pot. elettrica reattiva
VAR_m	pot. reattiva di magnetizz.
VAR_s	pot. reatt. secondaria
Vl	volume in genere
vl	volume unit. (di 1 spira)
W	pot. elettrica reale utile
W'_d	pot. elettr. reale perduta
W_p	potenza reale primaria
W_s	potenza reale secondaria
W'_{fe}	potenza reale perduta nel ferro
W'_p	potenza reale perduta nel rame primario
W'_s	potenza reale perduta nel rame secondario
ΔV	cad. di tensione assoluta
ΔV %	cad. di tensione percent.
$\Delta V'$ %	diff. teorica percentuale tra f.e.m. e tens. a carico
φ	angolo di sfasam. fra tens. e corrente nel carico
φ'	angolo di sfasam. proprio del trasformatore
Φ	flusso magnetico
$\varnothing$	diametro condutt. (netto)
Σ	simbolo di sommatoria

PREFAZIONE

Questo libro si propone di effettuare una saldatura o, come ancora s'usa dire, di colmare una certa lacuna nella letteratura sui trasformatori: lacuna ancora esistente fra le numerosissime pubblicazioni sul calcolo pratico dei trasformatori di alimentazione tipo radio e simili da una parte e le maggiori autorevoli e ponderose trattazioni sui trasformatori industriali dall'altra.

Le prime hanno, come si è detto, un carattere esclusivamente pratico e si basano soprattutto su tabelle, nomogrammi e formule empiriche senza far cenno dello sviluppo teorico dei risultati esposti; le seconde, pur svolgendo ampiamente la parte teorica, sono però poco adatte al calcolo dei trasformatori di minima potenza e si presentano, all'uso corrente, meno agevoli.

Di fatto, la grande differenza nelle dimensioni, oltre a creare una notevole diversità nella pratica costruttiva, porta anche su un altro piano alcuni concetti che pure sono di generale applicazione: taluni elementi che in un caso risultano trascurabili non lo sono affatto nell'altro e viceversa; gli ordini di grandezza di alcuni dei principali elementi del calcolo sono in qualche caso così distanti che le considerazioni accettate per certe scale di valori debbono essere rivedute per altre.

Sono convinto che un manuale che si tenga in una posizione intermedia tra i due tipi di pubblicazioni accennati, completando con considerazioni teoriche la parte esclusivamente pratica già da molti ampiamente trattata, possa essere ben accetto da parte dei costruttori, grandi e piccoli, di trasformatori e possa riuscire di giovamento anche a chi, pur non costruendo personalmente, ha a che fare con essi e desidera conoscerne con una certa completezza i problemi relativi.

Il carattere di questo libro è dunque teorico pratico: la teoria classica

è accennata sommariamente nei suoi punti essenziali (1); *mentre talune nozioni pratiche di carattere elementare si presumono già in possesso di chiunque si interessi dell'argomento. Nella successione delle varie parti ho cercato, per quanto possibile, di renderle indipendenti fra loro avvicinandole più al carattere di note particolari che non a quello di capitoli fra loro conseguenti: e ciò perchè ciascuno possa, ove occorra, consultare una parte senza che ciò imponga la necessità della perfetta conoscenza delle precedenti.*

Particolare cura è stata posta nell'unificazione delle notazioni e delle unità di misura, ricordando per esperienza che la pratica applicazione di una formula è strettamente legata alla chiara specificazione delle unità di misura dei suoi fattori e del risultato.

Non dimenticando che, in ultima analisi, ciò che si vuole ottenere sono delle norme e dei dati per la effettiva costruzione, ho abbondato, dove necessario, negli esempi pratici in applicazione delle formule teoriche; nè ho trascurato una certa critica dei varii orientamenti nel progetto di un trasformatore.

Una sufficiente estensione ho dato al capitolo relativo agli autotrasformatori, causa la quasi totale assenza di pubblicazioni esaurienti sviluppate sull'argomento.

In appendice, per il calcolo del minimo costo, *ho creduto opportuno di riportare per sommi capi il procedimento di due autori stranieri, di recente pubblicazione, e veramente lodevole per la sua accuratezza e generalità: non ho comunque trascurato di aggiungervi le mie personali osservazioni e chiarimenti specie per quanto riguarda il valore delle formule nell'applicazione ai trasformatori radio che sono fra i più piccoli della famiglia ed hanno caratteristiche un po' particolari.*

Poichè non pretendo di aver fatto opera perfetta, sarò grato a tutti coloro che vorranno farmi pervenire le loro osservazioni; per intanto mi auguro che questa fatica possa riuscire di aiuto sopratutto a coloro (e sono molti) che, avendo affrontato i problemi costruttivi prima di quelli teorici, desiderano ora crearsi quel minimo bagaglio di cognizioni teoriche che sole possono permettere il perfezionamento tecnico ed economico del prodotto e che la pratica delle costruzioni da sola non può loro fornire.

L'Autore

Milano, Novembre 1954.

---

(1) Si potrà osservare che talvolta la parte teorica è ridotta al minimo o trascurata mentre in altri punti è assai sviluppata. Ciò è stato fatto di proposito: le nozioni teoriche appena accennate riguardano la parte generale ampiamente esposta in altre pubblicazioni; sviluppate a fondo sono invece le teorie originali, non trattate o sommariamente accennate in altri libri. Questo anche per il carattere di questo manuale che non vuol essere un completo trattato sull'argomento ma, come già dissi, un completamento di quelli già esistenti.

Parte I

T E O R I A

NOZIONI DI ELETTROTECNICA

Qualche richiamo sulle grandezze alternative.

Prima di iniziare la trattazione vera e propria dei trasformatori occorre fare qualche richiamo o dare qualche nozione sulle grandezze alternative e loro relazioni, dato che la conoscenza, sia pure ridotta agli elementi base, della teoria delle grandezze alternative è essenziale per la comprensione del funzionamento dei trasformatori.

Grandezza alternativa. E' una entità il cui valore non è costante, ma varia nel tempo in un modo qualsiasi, ripetendo il ciclo di variazione a intervalli di tempo eguali.

Periodo di una grandezza alternativa. E' appunto il tempo, espresso in secondi, intercorrente fra l'inizio di un ciclo di variazione e l'inizio di quello immediatamente successivo. E' comunemente indicato con *T*.

Frequenza di una grandezza alternativa. E' il numero di cicli di variazione contenuti nel tempo di un secondo. Si misura quindi in periodi al secondo e si indica correntemente con la lettera *f*.

Grandezze alternative sinusoidali. Sono un caso particolare delle g. a. quando la legge di variazione sia sinusoidale. Tutte le correnti alternate a frequenza industriale (16-100 periodi al secondo) sono grandezze sinusoidali o vengono almeno conside-

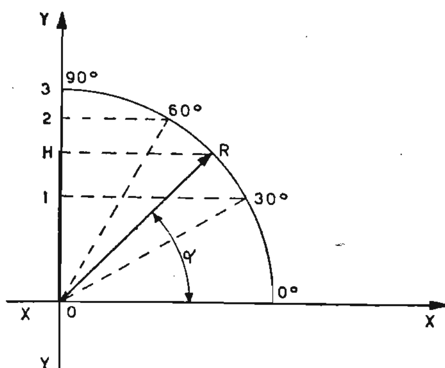


Fig. 1 - Rappresentazione vettoriale di una grandezza alternativa sinusoidale.

rate tali agli effetti del calcolo. Ci occuperemo pertanto solo di g.a.s.

Valore massimo di una grandezza alternativa sinusoidale. E' il più grande dei valori assunti dalla g.a.s. durante il ciclo di variazione.

Rappresentazione geometrica di una g.a.s. Per farci una idea di quello che significa una grandezza alternativa sinusoidale ricorriamo al seguente metodo: immaginiamo (fig. 1) un segmento *OR*, la cui lunghezza sia

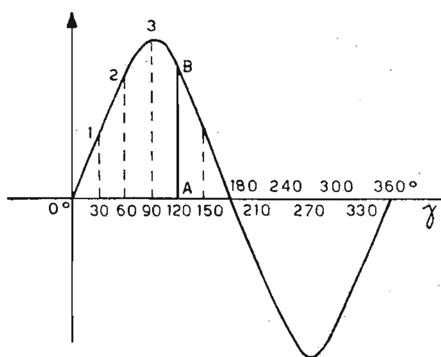


Fig. 2 - Rappresentazione grafica di una sinusoide.

proporzionale, in una scala qualsiasi, al valore massimo della g.a.s. da rappresentare. Si supponga che questo segmento ruoti, con velocità costante, intorno al suo estremo *O*. La sua velocità di rotazione sia tale che occorra un tempo eguale al periodo della g.a.s. perchè esso compia un giro completo.

Misuriamo gli spostamenti con l'angolo α che in una certa posizione esso forma con la retta *XX* sulla quale giaceva all'inizio del movimento. Il valore istantaneo che la g.a.s. assume in quel momento è misurato, nella stessa scala assunta per il segmento *OR*, dal segmento *OH*, ottenuto abbassando dall'estremo *R* la perpendicolare sulla retta *YY*.

Segnamo ora, su una retta qualsiasi γ (fig. 2) un segmento proporzionale a 360°; suddividiamolo quindi in un certo numero di parti eguali, ad esempio 12: ognuna di queste parti rappresenterà quindi un angolo di 360 : 12 = 30°. Corrispondentemente agli angoli progressivi così fissati (0°, 30°, 60°, ecc.) determiniamo, servendoci della rappresentazione di fig. 1, i successivi valori 1, 2, 3, ecc. del segmento *OH* precedentemente citato. Riportiamo la lunghezza di questi segmenti, in corrispondenza agli angoli relativi, a partire dall'asse γ e perpendicolarmente ad esso. Uniamo ora gli estremi di tali segmenti con una linea continua: questa linea è una sinusoide.

Il valore che la g.a.s. assume in un istante qualsiasi, corrispondente ad un generico angolo β (fig. 2), è quindi determinato dalla lunghezza dell'intercetta *AB* sulla perpendicolare innalzata dall'asse γ in corrispondenza di tale angolo. L'esame della stessa fig. 2 ci conduce alle seguenti considerazioni:

1°) Il ciclo di variazione (o alternanza) di una g.a.s. è composto di due mezze alternanze, eguali fra loro ma di senso opposto.

2°) Conseguentemente, in un periodo la g.a.s. assume due volte il suo valore massimo (uno in senso positivo ed uno in senso negativo) e passa due volte per il valore zero. Il tempo corrispondente ad una mezza alternanza è di mezzo periodo.

Valore efficace di una g.a.s. Quale sarà, dei tanti valori assunti nel tempo da una g.a.s., quello da considerare per individuarne la grandezza? Dato che la legge di variazione è stabilita e fissa, sarà sufficiente prenderne uno qualsiasi riferito ad un angolo opportunamente scelto; in particolare il valore massimo apparirebbe come il più adatto. Nelle applicazioni pratiche riesce però più conveniente scegliere un valore minore di questo, e precisamente 0,708 V_{max}, denominato *valore efficace* (1).

Cercherò di chiarire in modo semplice perchè si sia scelto proprio questo valore: tutti sanno che in un circuito di resistenza *R* percorso da una corrente costante *I* si dissipa una potenza elettrica, secondo la legge di Joule, pari a RI^2. Orbene, se la corrente non è costante, ma è una g.a. qualsiasi, la legge di Joule si verifica ancora esattamente se si pone per *I* il valore efficace di essa.

In altre parole, una g.a., agli effetti generativi o dissipativi di potenza (o in qualunque altra relazione in cui essa compaia elevata al quadrato), può essere considerata come se fosse una grandezza costante di valore eguale a quello efficace.

In tutte le considerazioni che seguiranno, quando noi parleremo di valore di una g.a.s. intenderemo sempre riferirci, anche se non specificatamente indicato, al suo valore efficace.

(1) Si definisce valore efficace di una g.a. la radice della media dei quadrati dei valori istantanei assunti da essa in un semiperiodo. Per le g.a.s. il calcolo ci porta appunto al risultato: $V_{eff}/V_{max} = 0{,}708$ come indicato. Per g.a. diverse dalla sinusoidale il rapporto è naturalmente diverso.

Angolo di sfasamento. Capita molto spesso, nelle applicazioni, di dover mettere in relazione fra loro due o più grandezze alternative sinusoidali. Queste grandezze, oltre ad essere di diversa natura (correnti, tensioni, potenze) potranno avere naturalmente diverso valore e diverso periodo. Noi non considereremo però mai il caso in cui il periodo sia diverso, dato che nelle applicazioni che ci interessano avremo sempre a che fare con grandezze a periodo, e cioè frequenza, eguali.

Dire però che due g.a.s. hanno periodo eguale non vuol necessariamente dire che esse assumano contemporaneamente il loro valore massimo positivo: in fig. 3, ad esempio, sono rappresentate due g.a.s. di eguale periodo, ma i cui valori massimi positivi si verificano a distanza di un angolo φ fra di essi; tale angolo si chiama angolo di sfasamento tra le due g.a.s. La grandezza 1, che raggiunge prima della 2 il valore massimo positivo si dice *sfasata in anticipo* sulla 2; viceversa la 2 si dirà *sfasata in ritardo dell'angolo* φ sulla 1.

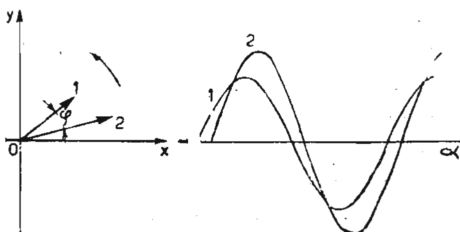


Fig. 3 - Relazioni di fase in rappresentazione vettoriale e grafica.

I relativi segmenti ruotanti 01 e 02 che hanno generato le due relative si-

nusoidi, sono naturalmente anch'essi spostati dell'angolo φ; nella loro rotazione, eguale essendo per ambedue il periodo, e cioè la velocità con cui ruotano, essi conserveranno la loro reciproca posizione in qualunque momento. Nel caso particolare che l'angolo φ sia 0° le due g.a. si dicono *in fase*: se φ è eguale a 90°, *in quadratura*, se infine è 180°, *in controfase.*

Potenza in un circuito elettrico.

Un circuito elettrico, qualunque esso sia, ai cui capi sia applicata una tensione *V* e in cui circoli una corrente *I*, è sede di una potenza di valore *VI*; questa grandezza si chiama *potenza apparente* del circuito. Se tensione e corrente non sono in fase, ma sono tra loro sfasate di un angolo φ si possono considerare anche due altre espressioni:

$W = VI \cos \varphi$ *potenza reale* del circuito;

$VAR = VI \text{ sen } \varphi$ *potenza reattiva* del circuito (2).

La relazione fra le tre potenze ora elencate è la seguente:

$$VAR^2 + W^2 = VI^2 \qquad \text{(I-1)}$$

E' molto importante comprendere bene quale sia la vera essenza di queste espressioni e quali i caratteri distintivi di queste tre potenze: cercherò qui appresso di spiegarlo il meglio possibile.

Potenza apparente. Quando in un circuito elettrico circola una corrente *I*, se la resistenza del circuito è *R*, la potenza dissipata è RI^2. Come si vede, in questa espressione la g.a.s. è una sola, *I*, e non può quindi essere considerato alcun angolo di sfasamento con la tensione che ha prodotto questa corrente: il fenomeno dissipativo prescinde quindi dalle relazioni angolari fra tensione e corrente e dipende solo dal valore di *I*. Anche nell'espressione *VI* della potenza apparente non si tien conto dell'angolo di fase fra tensione e corrente, così come nell'espressione RI^2: pertanto la potenza apparente è quella a cui dovremo fare riferimento quando si tratterà di fenomeni dissipativi.

Potenza reale. Come indica il nome, essa rappresenta la vera potenza, capace di essere trasformata in lavoro utile: essa è tanto più vicina in valore alla potenza apparente quanto più piccolo è l'angolo di sfasamento tra tensione e corrente.

(2) Cos φ e sen φ sono rispettivamente le funzioni coseno e seno dell'angolo φ. Per chi non ha nozioni di trigonometria sarebbe troppo lungo spiegarne il significato: del resto qualunque trattato elementare di trigonometria lo insegna. Se il lettore non vuol riferirvisi, si accontenti di sapere che cos φ varia tra 1 e 0 quando φ varia tra 0° e 90° mentre corrispondentemente sen φ varia tra 0 e 1.

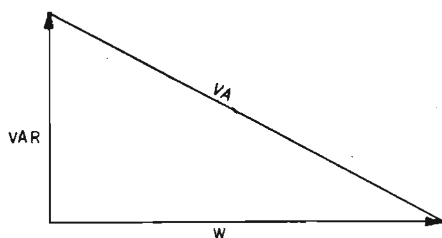


Fig. 4 - Composizione vettoriale della potenza reale con quella reattiva.

Potenza reattiva. Il nome di potenza dato a questa grandezza è giustificato solo dal fatto che in essa, come nelle altre due, compare il prodotto tensione - corrente; nel vero senso della parola non lo meriterebbe, dato che da essa non è possibile ricavare lavoro utile. Con un paragone piuttosto curioso, sarebbe come voler far correre un vagone sulle rotaie spingendolo esattamente di fianco. La potenza reattiva è nulla quando corrente e tensione si trovano in fase.

Rappresentazione geometrica delle potenze alternative. Poichè esse derivano da un prodotto di g.a.s., anche le potenze sono g.a.s. di frequenza eguale a quella comune della tensione e della corrente che le generano: saranno quindi rappresentabili nello stesso modo con cui abbiamo rappresentato una g.a.s. qualsiasi. Quanto agli sfasamenti, potenza reale e potenza reattiva di uno stesso circuito vanno rappresentate con segmenti spostati fra loro di 90° (in quadratura): la potenza apparente risulta allora rappresentata dalla diagonale del rettangolo costruito prendendo gli altri due come lati (fig. 4) il che giustifica la relazione (I-1) già precedentemente esposta.

Unità di misura delle potenze:

Le potenze apparenti si misurano in *VA* (volt-ampère).

Le potenze reali si misurano in *W* (watt).

Le potenze reattive si misurano in *VAR* (Var o volt-ampère reattivi).

Esempio esplicativo. Un esempio chiarirà meglio le idee su questo argomento, che è veramente basilare per gli argomenti che seguiranno. Si supponga che un certo circuito utilizzatore assorba, non importa come, 100 *W* e 50 *VAR*. Questo circuito (fig. 5) sia alimentato, a mezzo di una linea di resistenza *R*, da un alternatore, mosso a sua volta da una turbina idraulica. Si supponga che la turbina abbia rendimento 1 e che le perdite nel circuito alternatore-linea siano esclusivamente quelle dovute alla resistenza dei conduttori, segnata nella fig. 5. Proponiamoci di vedere quale potenza assorba la turbina dalla condotta che la alimenta. Se non esistesse nè la linea nè l'alternatore,

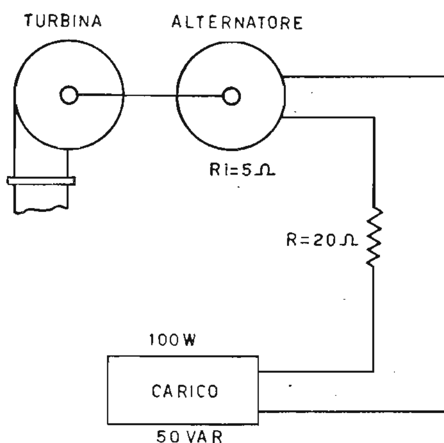


Fig. 5 - Circuito generatore-carico con linea di collegamento resistiva.

questa potenza sarebbe senz'altro di 100 W (abbiamo supposto 1 il rendimento della turbina) poichè i 50 VAR non corrispondono, abbiamo già detto, ad alcuna potenza effettiva. Ma la presenza della linea e dell'alternatore ci impongono di calcolarne le perdite, che vanno sommate alla potenza reale assorbita dal circuito utilizzatore: e queste perdite saranno evidentemente quelle dovute all'effetto Joule nei conduttori, dato che abbiamo supposto non esisterne altre. Dovremo quindi innanzi tutto calcolare la corrente che in questi conduttori circola.

Poichè abbiamo visto che ai fenomeni dissipativi va associata la potenza apparente, calcoliamo quest'ultima. Essa è, secondo la (I-1):

$$VI = \sqrt{W^2 + VAR^2} =$$
$$= \sqrt{100^2 + 50^2} = 112\ VA.$$

Se, ad esempio, la tensione di linea all'arrivo è di 100 V, la corrente nei fili sarà di 112/100 = 1,12 A e, dato che la resistenza complessiva dei conduttori dell'alternatore e della linea è di 25 ohm, la perdita di potenza (reale) sarà:

$$1{,}12^2 \times 25 = 1{,}25 \times 25 = 31{,}25\ W.$$

Come si vede, della potenza reattiva assorbita non abbiamo fatto alcun calcolo, salvo che nel computo della corrente di linea e relativa perdita Joule. Se il circuito non avesse richiesto questa potenza reattiva, la corrente di linea sarebbe stata soltanto di 1 A, la perdita Joule di 25 W; la potenza assorbita dalla turbina (nel primo caso di 100 + 31,25 W = = 131,25 W) sarebbe stata soltanto di 125 W con un risparmio di 6,25 W il che è come dire ca. il 5 %

Come si è visto, la potenza reattiva non è stata prelevata nè dall'acqua della condotta nè restituita dall'utilizzatore sotto forma di energia: questa potenza, o meglio la corrente ad essa relativa, circola nel circuito chiuso generatore-linea-carico provocandovi naturalmente delle perdite che potrebbero essere evitate se si impedisse a questa corrente di circolare (3).

(3) Le correnti reattive sono deleterie specie per il rendimento delle linee di trasmissione, e ben lo sanno i fornitori di energia elettrica che debbono sopportare delle perdite di energia per una potenza che non lo è e che essi non forniscono. Un sistema per ovviare all'inconveniente è quello di annullare le correnti reattive provocando, all'arrivo della linea, l'assorbimento artificioso di altre correnti eguali ma di senso opposto. Per i piccoli impianti, ad esempio, condensatori di opportuna capacità derivati ai capi del carico, generalmente induttivo, permettono di effettuare questa compensazione impedendo che la linea venga percorsa da altre correnti che non siano quelle corrispondenti alla potenza reale. E' il problema ben noto del rifasamento.

TEORIA DEL FUNZIONAMENTO

Funzionamento a vuoto di un trasformatore.

Il trasformatore è una macchina elettrica statica (cioè senza parti in movimento) capace di attuare una variazione nei valori dei due fattori della potenza elettrica (tensione e corrente) senza alterare notevolmente il loro prodotto.

L'effetto suddetto è ottenuto creando, con la stessa energia da trasformare, un campo magnetico alternativo e concatenando con questo un numero di spire più o meno grande a seconda della tensione desiderata. In queste spire si viene a generare per induzione una f.e.m. Più precisamente il trasformatore assume in pratica l'aspetto schematicamente rappresentato in fig. 6: *CM* è il circuito magnetico sul quale sono avvolte le due spirali: primaria (lato rete di alimentazione) di N_p spire e secondaria (lato del carico) di spire N_s. Applicando una opportuna tensione all'avvolgimento primario (con l'avvolgimento secondario non caricato) si ha in esso la circolazione di una corrente (corrente a vuoto, I_v) di cui una parte (corrente magnetizzante, I_m) percorrendo le N_p spire provoca una forza magnetomotrice proporzionale a $N_p \cdot I_m$. Questa, a sua volta, crea e

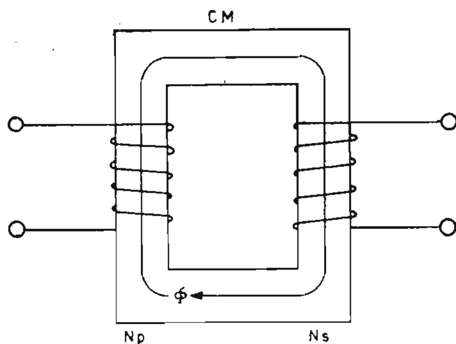


Fig. 6 - Rappresentazione elementare di un trasformatore.

mantiene un flusso magnetico alternativo Φ, della stessa frequenza della corrente magnetizzante e con essa in fase. Nelle N_s spire secondarie

attraversate dal flusso Φ si genererà allora, per induzione, una f.e.m. che risulta proporzionale al valore del flusso, alla sua frequenza e al numero delle spire secondarie secondo la relazione:

$$E = 4{,}44 \cdot \Phi \cdot f \cdot N_s \cdot 10^{-8} \text{ volt} \quad \text{(I-2)}$$

formula base per il calcolo dei trasformatori.

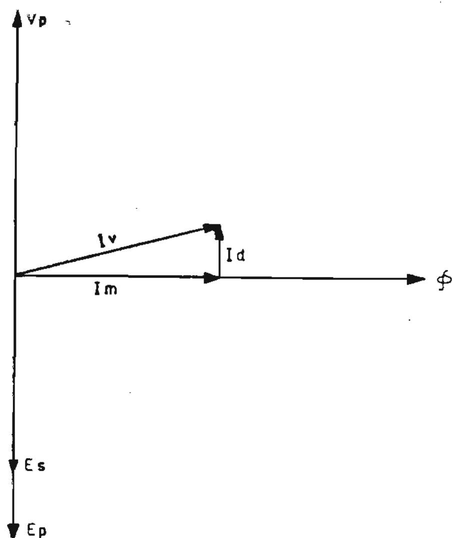


Fig. 7 - Diagramma vettoriale di un trasformatore nel funzionamento a vuoto.

In essa Φ rappresenta il valore massimo del flusso (non si dimentichi che il flusso in un trasformatore è una g.a.) espresso in linee, f la frequenza in Hz e N_s il numero delle spire secondarie. Quanto alla fase, risultando questa f.e.m. per induzione dal flusso Φ, essa è in quadratura con quest'ultimo e di conseguenza anche con la corrente magnetizzante.

Il funzionamento a vuoto del trasformatore, così tracciato in brevi parole, può essere reso più comprensibile graficamente, per chi abbia le indispensabili nozioni necessarie, mediante la rappresentazione vettoriale riportata nella fig. 7. La tensione primaria V_p applicata all'avvolgimento primario provoca la circolazione della corrente magnetizzante I_m che, essendo una corrente reattiva, risulta sfasata in ritardo di 90° rispetto alla stessa V_p: la I_m crea il flusso Φ in fase con essa: la circolazione di Φ nel circuito magnetico ed il relativo concatenamento con gli avvolgimenti primario e secondario dà luogo infine alle forze elettromotrici E_p ed E_s nei rispettivi avvolgimenti. Come si vede, E_p risulta in opposizione di fase con V_p e di eguale valore (se si trascura la caduta di tensione nel primario, sempre piccola nel funzionamento a vuoto): viene pertanto considerata come una forza controelettromotrice rispetto alla tensione applicata V_p.

E_s risulta essa pure in opposizione di fase con V_p ossia il fenomeno della trasformazione provoca un rovesciamento di fase tra la f.e.m. secondaria e la tensione primaria: ciò non ha alcuna importanza nelle applicazioni dato che, nel caso che occorra conservare le relazioni di fase, è sufficiente invertire le connessioni dei capi dell'avvolgimento secondario.

Nella fig. 7 è pure rappresentata la corrente I_d, corrispondente alle perdite nel ferro (di cui parleremo più appresso): questa corrente, corrispondendo ad una potenza reale, è in fase con la tensione primaria e la sua composizione con la corrente magnetizzante dà luogo alla corrente a vuoto I_v che, per la piccolezza della I_d, risulta ancora quasi in quadratura con la tensione applicata.

Funzionamento a carico.

Visto che cosa avviene quando ad un trasformatore sia applicata una tensione senza assorbire potenza dal secondario, esaminiamo ora i fenomeni elettrici che intervengono quando si applichi ad esso un carico, ovverossia quando si chieda al secondario di erogare una certa corrente.

Il procedimento logico da seguirsi è quello di risalire da valle a monte, ossia di procedere dal carico verso l'alimentazione e non viceversa: è infatti da tenersi ben presente, ora e in appresso, che, una volta determinato il valore della tensione applicata ad esso, *è il carico che determina le condizioni di funzionamento del trasformatore.*

Quello che avviene quando al secondario del trasformatore si richiede una certa corrente può essere, in maniera grossolana ma semplice, così spiegato: la corrente che ora circola nel carico percorre anche, naturalmente, l'avvolgimento secondario e crea pertanto a sua volta un flusso magnetico in fase con essa. Questo flusso, componendosi con quello già esistente nel funzionamento a vuoto, turba l'equilibrio delle forze elettromotrici: in particolare la f.c.e.m. primaria non bilancia più esattamente la tensione primaria applicata onde deve necessariamente nascere una corrente nel primario che produca un flusso di intensità eguale ed opposta a quello creato dalla corrente secondaria: è ovvio quindi che, in primo luogo, corrente secondaria e primaria dovranno essere in controfase, mentre per quanto riguarda il valore noteremo che, essendo i flussi proporzionali alle rispettive forze magnetomotrici e quindi al prodotto corrente-spire, si dovrà verificare:

$$N_p \cdot I_p = N_s \cdot I_s \qquad \text{(I-3)}$$

e cioè:

$$I_p / I_s = N_s / N_p \qquad \text{(I-4)}$$

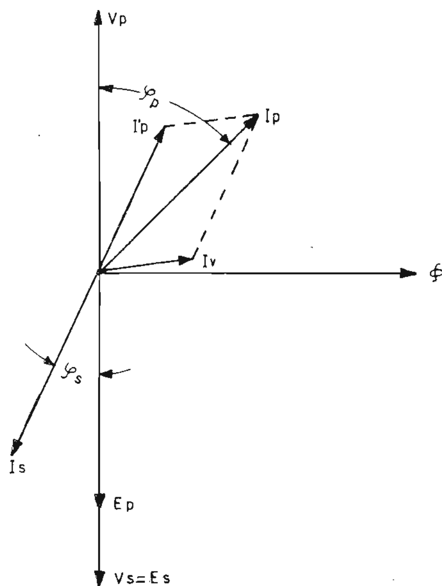


Fig. 8 - Funzionamento a carico di un trasf. con avvolgimenti a impedenza nulla.

il che, in parole povere, può essere espresso dicendo che il rapporto delle correnti primaria e secondaria deve eguagliare il rapporto inverso del rispettivo numero di spire.

Come già abbiamo fatto nel caso del funzionamento a vuoto, segnamo graficamente in fig. 8 la posizione reciproca dei singoli vettori rappresentativi delle grandezze in giuoco nel funzionamento a carico, avvertendo che in questa rappresentazione non si è tenuto conto ancora delle cadute di tensione che si verificano negli avvolgimenti.

La figura, dopo quanto detto precedentemente, non ha bisogno di commento: osserviamo soltanto che in questo come in ogni altro caso si verifica sempre che la tensione primaria è in opposizione con la f.e.m. secondaria, e altrettanto avviene per le due correnti; il vettore flusso risulta in quadratura con le f.e.m. Il tracciamento del diagramma avviene partendo dalla tensione secondaria e dalla corrente secondaria, separate dall'angolo φ_s, dati questi tutti determinati dalle condizioni del carico su cui il secondario lavora: il valore della corrente primaria I'_p è stabilito dalla (I-4) mentre il valore della f.c.e.m. primaria si determina facilmente pensando che le f.e.m. sono proporzionali al numero delle spire e che quindi dovrà sussistere la relazione:

$$E_p / E_s = N_p / N_s \qquad \text{(I-5)}$$

La composizione geometrica della corrente I'_p con la corrente I_v, già esistente nel funzionamento a vuoto ci determina la corrente I_p assorbita dalla linea di alimentazione, nonchè l'angolo φ_p di cui essa è spostata rispetto alla tensione di alimentazione.

Diagramma vettoriale completo.

La rappresentazione della fig. 8 non corrisponde esattamente alla realtà poichè non tiene conto delle cadute di tensione che si verificano negli avvolgimenti. La caduta sopradetta è dovuta a due cause che potremo considerare indipendenti fra loro: resistenza degli avvolgimenti e loro reattanza. Che cosa sia la resistenza di un conduttore è ben noto a tutti: meno familiare è il concetto di reattanza: essa corrisponde ad una corrente reattiva che crea nel circuito magnetico un flusso che si concatena soltanto con l'avvolgimento che lo ha creato senza attraversare minimamente l'altro; dispersione di flusso che si verifica sempre, in misura maggiore o minore, in un trasformatore. La reattanza degli avvolgimenti può essere ridotta al minimo incastrando bene l'una nell'altra le spirali primaria e secondaria. Come si presenti il diagramma vettoriale com-

pleto del funzionamento a carico di un trasformatore si può vedere in fig. 9, derivata da quella di fig. 8 con l'aggiunta delle cadute di tensione sia resistiva che reattiva. Noteremo soprattutto che qui non si possono più confondere fra loro tensioni ai morsetti e forze elettromotrici negli avvolgimenti: la differenza fra le due grandezze è rappresentata ap-

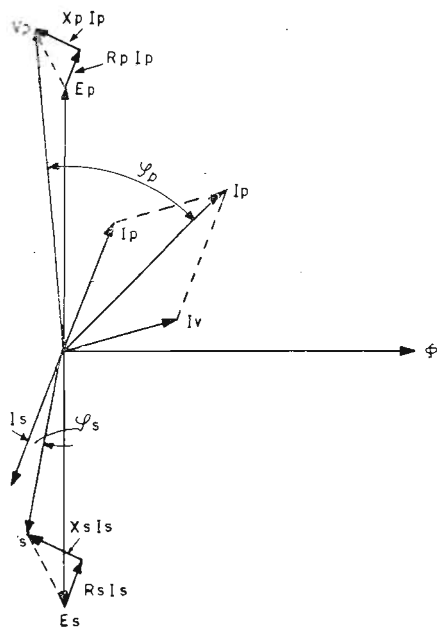


Fig. 9 - Funzionamento a carico di un trasformatore reale.

punto dalla caduta di tensione relativa. Circa il valore e la direzione dei segmenti che rappresentano le cadute di tensione si abbia ben presente che:

1°) La caduta di tensione resistiva ha valore eguale al prodotto *RI* ed è diretta come la corrente che la produce: la caduta reattiva è pari al prodotto *XI* ed è in quadratura e in ritardo rispetto alla stessa corrente.

2°) Se la reattanza non è forte e tensione e corrente non sono sfasate di gran che fra di loro la caduta reattiva, pur avendo un'importanza notevole agli effetti degli angoli di fase ha una scarsa influenza sul valore assoluto della caduta di tensione che può quindi essere considerata dovuta praticamente alla sola resistenza.

Poichè nei piccoli trasformatori a mantello i flussi dispersi possono essere notevolmente ridotti e il cos φ del carico è in genere elevato, ci è concesso fare astrazione dalle cadute reattive tanto più che le relazioni angolari fra tensione e corrente hanno ben poca importanza nelle relative applicazioni pratiche.

Si tenga comunque presente che, qualora si vogliano definire, in sede di progetto o di verifica, le esatte condizioni di funzionamento di un trasformatore, il ricorso alla rappresentazione vettoriale completa di fig. 9 si impone come il mezzo più comodo e spiccio per determinare per via geometrica i valori assoluti e le relazioni angolari degli elementi che interessano.

Gli elementi base per il tracciamento (tensione e corrente secondaria, loro sfasamento, resistenza e reattanza degli avvolgimenti, ecc.) possono essere misurati in sede di controllo o calcolati in sede di progetto con notevole esattezza; il calcolo della reattanza è il solo che possa essere affetto da errori notevoli.

Non ci occuperemo comunque, nè ora nè dopo, di calcoli vettoriali da-

to il carattere volutamente pratico della trattazione ed il fatto che leggeri errori nel calcolo possono essere perfettamente tollerati nel caso di piccoli trasformatori in cui altre cause di errore possono essere introdotte da imperfetta conoscenza della natura dei materiali: ad ogni modo quanto esposto finora non è superfluo perchè ci permetterà di renderci conto di quali errori possono affettare il nostro calcolo e quale precisione quindi possa aspettarsi dai risultati.

PERDITE NELLA TRASFORMAZIONE

Generalità

Abbiamo visto precedentemente che la condizione di eguaglianza delle forze magnetomotrici dovute alle correnti primaria e secondaria porta alla relazione:

$$N_p / N_s = I_s / I_p$$

Si è visto pure che la relazione esistente fra le forze elettromotrici è retta dall'eguaglianza:

$$N_p / N_s = E_p / E_s$$

Dato che i primi membri delle due equazioni ora scritte sono eguali fra loro, potremo eguagliare i due secondi membri scrivendo:

$$I_s / I_p = E_p / E_s$$

o, il che è lo stesso:

$$I_s \cdot E_s = I_p \cdot E_p \qquad \text{(I-6)}$$

Questa relazione racchiude in sè la spiegazione del funzionamento del trasformatore: essa dice infatti che, nella trasformazione, rimane inalterato il prodotto della forza elettromotrice primaria per la corrente relativa: al secondario i termini di questo prodotto potranno essere (e lo sono infatti nella gran maggioranza dei casi) diversi ma il loro prodotto rimarrà inalterato, onde si potranno ottenere, da tensioni basse con forti correnti, tensioni elevate con correnti basse o viceversa, ferma restando l'esigenza imposta dalla (I-6).

Se in un primo tempo si suppone che nessuna perdita avvenga nella trasformazione, ovverossia che il mantenimento del flusso non richieda alcuna potenza e che la corrente, percorrendo gli avvolgimenti non produca nessuna perdita per riscaldamento, allora potremo, come si è visto in precedenza, confondere le forze elettromotrici con le tensioni effettive ai morsetti e pertanto scrivere:

$$I_s \cdot V_s = I_p \cdot V_p$$

relazione semplificata che può essere usata per orientamento.

Ma quanto si è supposto adesso non ha alcun fondamento pratico: specie nei piccoli trasformatori la percentuale di potenza che viene dissipata sotto forma di calore in fenomeni accessori è tutt'altro che trascurabile: onde è assolutamente necessario tenerne conto.

Rimandando alla seconda parte lo studio della determinazione numerica di queste perdite, vediamola ora sotto l'aspetto teorico generale.

Perdite nel ferro.

Due specie di perdite si rilevano in un trasformatore: perdite nel circuito magnetico (o perdite nel ferro) e perdite negli avvolgimenti (o perdite nel rame). Le perdite nel ferro si suddividono a loro volta in due categorie: perdite per isteresi e perdite per correnti parassite. Senza addentrarci troppo profondamente nella spiegazione delle cause fisiche che le determinano, ci accontenteremo di dire che le prime sono dovute al fatto che il flusso magnetico, come la corrente che lo produce, è alternato e in ogni ciclo di variazione si dissipa una piccola potenza per la resistenza che il ferro presenta contro le variazioni di flusso che in esso alternativamente si producono: fenomeno fisico che, vistoso nel ferro puro, viene fortemente attenuato dalla lega di questo con piccole percentuali di silicio, onde soltanto il ferro-silicio viene usato nei circuiti magnetici a flusso alternato.

Le perdite della seconda categoria, quelle per correnti parassite, sono invece più facili a spiegarsi; basta pensare che nella massa del ferro, per effetto del flusso in esso circolante, si determinano delle correnti per induzione le quali circolano in piani perpendicolari all'asse del flusso stesso. Per ridurre al minimo queste correnti, che evidentemente rappresentano una perdita inutile, non c'è che aumentare la resistenza del circuito da esse percorso, lamellando il circuito magnetico e isolando nel miglior modo i lamierini fra loro. Ovviamente la lamellazione va effettuata nel senso del flusso, permettendo così a questo di circolare liberamente come se il pacco non fosse lamellato mentre resta tagliata la via alla circolazione delle correnti parassite.

L'introduzione del silicio in lega con il ferro è pure di giovamento in quanto aumenta la resistività elettrica del materiale migliorando le condizioni di lavoro agli effetti delle perdite suddette.

Perdite nel rame.

Queste perdite sono essenzialmente dovute all'effetto Joule causa la resistenza dei conduttori che costituiscono l'avvolgimento. Perdite parassite analoghe a quelle già riscontrate nel ferro assumono importanza soltanto in trasformatori di grandissima potenza, per le notevoli dimensioni in sezione dei conduttori; per i piccoli trasformatori di cui ci occupiamo sono del tutto trascurabili.

Si noti che se, come abbiamo più innanzi supposto, si trascura la caduta di tensione reattiva, la perdita Joule RI^2 risulta, come la caduta di tensione RI, proporzionale alla resistenza dell'avvolgimento cui si riferisce, onde esiste una proporzionalità quasi esatta, specie per trasformatori lavoranti su carichi puramente resistivi ($\cos \varphi = 1$), tra la perdita nel rame e la caduta di tensione onde dall'una si può trarre motivo per la valutazione dell'altra e viceversa.

ELEMENTI BASE DEL CALCOLO

Induzione e corrente specifica.

La sollecitazione cui è sottoposto il ferro durante il funzionamento del trasformatore è definita dall'induzione magnetica *B*, detta anche flusso specifico in quanto essa rappresenta il numero di linee di flusso magnetico che attraversano l'unità di sezione del circuito. Misurando il flusso in unità C.G.S., ossia in linee, l'induzione magnetica risulta espressa in linee/cm^2 e tale è l'unità di misura che verrà da noi comunemente usata. Nel sistema pratico diffusosi recentemente la si misura invece in Weber/m^2. 1 Weber/m^2 vale esattamente 10.000 linee/cm^2.

La sollecitazione del rame è invece definita dalla corrente che percorre l'unità di sezione del conduttore, analogamente a quanto avviene per il ferro e l'induzione magnetica. La si valuterà pertanto in Amp./mm^2, unità arbitraria ma molto comoda nelle applicazioni relative ai piccoli trasformatori in cui le sezioni usate per i conduttori sono molto modeste. L'uso dell'unità pratica (A/m^2) sarebbe in questi casi assolutamente scomodo per i calcoli.

Influenza della sollecitazione unitaria sulle perdite.

Nel ferro, l'aumento dell'induzione specifica influisce diversamente sulle perdite parassite e su quelle di isteresi, ma grosso modo si può dire che le perdite totali siano proporzionali al quadrato dell'induzione stessa. Altrettanto vale per la corrente specifica nei riguardi del rame: basta infatti pensare alla legge di Joule per convincersene.

Influenza del valore della frequenza nel dimensionamento di un trasformatore.

Il funzionamento di un trasformatore elettrico si basa essenzialmente sulle variazioni di flusso magnetico che vengono determinate nel nucleo dalle corrispondenti variazioni nel valore della corrente che circola nell'avvolgimento primario. Per le note leggi sulle f.e.m. indotte, tanto più rapida è la variazione del flusso, tanto maggiore risulta la f.e.m. Poichè, come meglio si vedrà in seguito, non è possibile superare un certo valor massimo del flusso magnetico a causa del fenomeno di saturazione del ferro, ne consegue che il valore della tensione ricavabile da un avvolgimento avente un certo numero di spire è strettamente legato alla velocità con cui avvengono le variazioni di flusso. Ora, questa velocità è determinata dalla frequenza della corrente di alimentazione del trasformatore, in quanto essa esprime quante volte in un secondo si verifica un ciclo completo di variazione della corrente e di conseguenza con quale velocità.

Quindi, quanto maggiore la frequenza di alimentazione, tanto maggiore la velocità di variazione e tanto maggiore la f.e.m. indotta.

Raggiunta questa semplice conclusione ne potremo trarre agevolmente una seconda e cioè la seguente: a parità di numero di spire un trasformatore potrà servire per tensioni tanto più alte quanto più elevata sarà la frequenza di alimentazione oppure, il che è lo stesso, per la stessa tensione potrà avere un numero di spire tanto minore quanto più alta sarà la frequenza. E dato che la sezione del filo occorrente per l'avvolgimento dipende solo dal valore efficace della corrente e non dalla sua frequenza, come ultimo risultato avremo che il prodotto tensione - corrente, ossia la potenza del trasformatore, crescerà se noi aumentiamo la frequenza di alimentazione. Di converso avremo che, dato un trasformatore progettato per una certa frequenza, se noi lo ricalcoliamo per una frequenza maggiore tenendo come base le stesse sollecitazioni dei materiali, ne otterremo un altro che richiederà meno spire, quindi meno rame e conseguentemente anche meno ferro in quanto lo spazio a disposizione per l'avvolgimento potrà essere ridotto.

Questa discussione, dal punto di vista costruttivo, ha un carattere puramente platonico in quanto non è generalmente in nostro potere scegliere la frequenza di alimentazione a piacimento: vale però a chiarire in quali condizioni più favorevoli si vengano a trovare ad esempio i costruttori americani che progettano trasformatori per la loro frequenza standard di 60 Hz nei confronti di

noi Italiani che dobbiamo costruire gli stessi trasformatori per la frequenza 42 Hz, tale essendo il valore più basso ancora riscontrabile nelle reti di distribuzione di energia elettrica in Italia. E' ovvio infatti che, pure esistendo vastissime zone del Paese che fruiscono di distribuzioni a 50 Hz, dato che i trasformatori devono essere in genere di uso universale, essi dovranno essere calcolati per la condizione più onerosa e cioè per quella che porta al maggior dimensionamento.

E si noti che non si tratta di differenze inapprezzabili: passando da 42 a 60 Hz si ottiene un risparmio nel rame di ca. il 30 %: se poi a questo aggiungiamo il fatto che in Italia dobbiamo costruire trasformatori con primario adatto a tutte le tensioni di rete esistenti e cioè da 110 a 220 V (280 se si comprendono anche le distribuzioni industriali), con conseguente aumento di rame nel primario rispetto a quelli americani costruiti per la sola tensione di 117 V, si giunge facilmente a constatare che la quantità di rame da noi impiegata in un trasformatore che abbia le identiche caratteristiche di prestazione di uno americano è maggiore di almeno il 100 %. Non ci si stupisca quindi delle limitate dimensioni e peso che si riscontrano nei trasformatori americani fatti per l'uso su territorio americano; in fatto di trasformatori non si possono fare grandi miracoli e le leggi dell'elettromagnetismo sono eguali per tutti: sono soltanto i diversi fattori della distribuzione di energia elettrica che creano queste sconcertanti diversità: onde è con piacere che vediamo anche in Italia, finalmente, procedere alla progettata unificazione delle tensioni di distribuzione ed alla elevazione della frequenza al valore di 50 Hz come in gran parte del resto dell'Europa.

Parte II

CALCOLO

DETERMINAZIONE DELLA POTENZA

Definizione della potenza di un trasformatore.

Si definisce potenza di un trasformatore la potenza apparente che quel trasformatore può erogare senza che il sopraelevamento di temperatura rispetto a quella ambiente superi un certo limite prefissato.

Generalmente questo limite ha un valore massimo di 35°-40° dato che, con temperatura base ambiente di 40° si giunge già così ad una temperatura effettiva di 75°-80° C la quale rappresenta un limite al disopra del quale l'integrità degli isolanti in esso contenuti verrebbe ad essere compromessa.

Naturalmente, dato che la potenza è limitata unicamente dal fenomeno del riscaldamento, le condizioni di raffreddamento e ventilazione influiscono sulla potenza erogabile.

Non si può pertanto, dal solo esame delle caratteristiche costruttive, determinare esattamente quale sia la effettiva potenza del trasformatore: questa (come meglio preciseremo appresso) può essere definita soltanto quando siano parimenti indicate la temperatura di lavoro e le condizioni di raffreddamento.

Impostazione generale del calcolo.

Si è già accennato in precedenza che le condizioni di lavoro del trasformatore sono determinate dalle caratteristiche del carico su cui esso funziona; questa circostanza va tenuta ben presente nell'impostazione del calcolo in quanto è appunto la determinazione delle condizioni di lavoro il primo compito del calcolatore.

Il progetto procede quindi da valle a monte e cioè dal secondario al primario, attraverso la precisazione, aprioristica o analitica, di determinati elementi geometrici ed elettrici.

Calcolo della potenza secondaria.

Nel caso generale la potenza secondaria è rappresentata dalla somma delle potenze richieste dai vari carichi applicati ai secondari del trasformatore.

In particolare il carico può essere uno solo se il secondario è unico; spesso però, e sempre nei trasformatori radio, i secondari sono più di uno (in genere da due a quattro) ed occorre prima di ogni cosa calcolare la potenza complessiva assorbita dai vari carichi (potenza secondaria totale).

Se non interessa tener conto del fattore di potenza che il trasformatore rifletterà sulla linea di alimentazione in quelle condizioni di carico, è sufficiente considerare la sola potenza apparente che ogni carico richiede, ossia il semplice prodotto della tensione per la corrente che, con quella tensione, esso assorbirà.

In generale questi elementi sono noti o ricavabili con semplicità dai dati relativi al carico.

Per il calcolo della potenza secondaria totale si procederà quindi a effettuare il prodotto tensione-corrente dei diversi carichi e quindi se ne farà la somma. Il risultato esprime, in *VA*, la potenza apparente complessiva che il trasformatore dovrà erogare.

Quanto sopra detto è perfettamente esatto quando i carichi assorbano tutti correnti sinusoidali; il che però talvolta non accade.

Vi sono casi, ad esempio, in cui la corrente viene assorbita solo durante parte del ciclo di variazione della tensione, come si verifica infatti quando il carico sia costituito da un raddrizzatore avente in parallelo una capacità o una batteria di accumulatori. E' interessante esami-

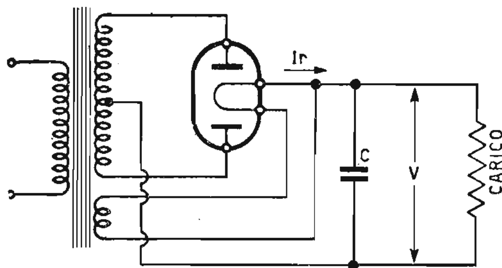


Fig. 10 - Trasformatore con rettificatore a due semionde su carico capacitivo.

mare con un po' di dettaglio soprattutto la prima di queste condizioni di lavoro, in quanto essa rappresenta la situazione tipica dei trasformatori radio, i quali appunto forniscono buona parte della loro potenza secondaria al raddrizzatore per la tensione anodica. I normali circuiti di raddrizzamento hanno infatti, come primo elemento del filtro, appunto un condensatore di notevole capacità (da 4 a 32 μF ed oltre).

La fig. 10 illustra un normale circuito rettificatore limitatamente agli elementi che ci interessano. La fig. 11 mostra invece il comportamento delle tensioni e delle correnti.

L'andamento del fenomeno è semplice: il raddrizzatore (trasf.-valvola) fornisce, come è noto, una tensione pulsante (linea sottile della fig. 11) la quale provoca, inizialmente, la carica del condensatore C fino alla tensione massima (punto D). A questo punto cessa l'erogazione di corrente da parte del raddrizzatore perchè, a partire da questo istante la sua tensione tende a valori minori di quello di carica del condensatore. Cessato il rifornimento di energia dalla valvola, è ora il condensatore che, scaricandosi secondo la nota legge esponenziale (tratto A - B), fornisce corrente al circuito di carico, mentre la stessa valvola impedisce che l'erogazione avvenga anche verso il trasformatore.

La scarica del condensatore continuerà fintantochè, nella successiva semionda, la tensione rettificata non assumerà un valore eguale (punto B) a quello raggiunto dalla capacità nella scarica.

In seguito il ciclo si ripete in modo eguale e periodico ad ogni semionda.

Come facilmente si constata, l'erogazione di corrente da parte del raddrizzatore avviene per un tempo minore di quello corrispondente ad una semionda completa.

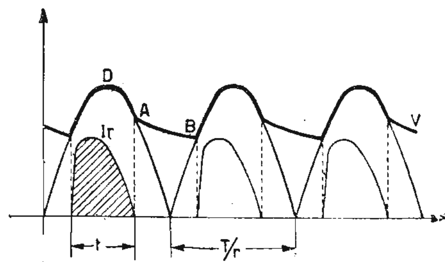


Fig. 11 - Forma della tensione e della corrente in un rettificatore su capacità.

La curva di variazione della corrente del rettificatore è indicata nella stessa fig. 11. La forma indicata è approssimata dato che essa dipende in larga misura dalle caratteristiche del trasformatore, della valvola, e dalla capacità del condensatore che influiscono naturalmente anche sulla sua durata rispetto al semiperiodo; in ogni caso è però vero che si tratta di un picco di corrente che assume un valore massimo molto elevato rispetto al valore medio della corrente nel carico. L'andamento della curva è ben diverso dal sinusoidale e l'erogazione avviene per impulsi e non in modo continuo.

Le normali formule finora stabilite, valevoli per grandezze alternative sinusoidali, perdono il loro valore. In particolare la corrente efficace circolante negli avvolgimenti così caricati non può esser calcolata con il normale rapporto: valore efficace = 1,11 valore medio che permetterebbe di risolvere il problema solo nel caso che la corrente rettificata alimentasse

un carico puramente ohmico. La questione è complicata dai due fatti concomitanti di cui abbiamo fatto cenno: forma dell'impulso di corrente diverso dalla sinusoidale e durata di tale impulso solo per una frazione di periodo. Il primo fatto non avrebbe, di per sè solo, soverchia importanza circa il rapporto valore efficace/valore medio dato che, anche se si considerasse la forma della corrente come, al limite, perfettamente rettangolare, il rapporto si sposterebbe dal valore 1,11 a 1; e poichè in effetti la forma reale giace tra le due ipotesi estreme, probabilmente detto valore potrebbe essere di 1,05-1,06 con trascurabile scarto rispetto a quello della forma sinusoidale. Ben maggiore importanza ha invece il fatto della breve durata nel tempo. Va infatti notato anzitutto che, per questa ragione, la corrente si comporta come fosse di frequenza assai maggiore (circa nel rapporto: semiperiodo/durata di un impulso); questa circostanza influisce sulla caduta di tensione reattiva (vedi Cap. II) essendo la reattanza degli avvolgimenti direttamente proporzionale alla frequenza della corrente che li percorre: non sempre quindi si può prescindere dalla reattanza nel conteggio della caduta di tensione Ma il maggior guaio della forma impulsiva che ci porterà ad un aumento delle dimensioni del trasformatore, è, in ultima analisi, questa circostanza: che dovendosi verificare l'eguaglianza fra l'energia dissipata nel carico nel tempo di un periodo e il prodotto tensione $\times$ corrente efficace $\times$ tempo di durata degli impulsi compresi in un periodo, è evidente che la corrente efficace anzidetta, essendo la tensione circa quella sul carico e il tempo estremamente ridotto, risulterà molto elevata rispetto alla corrente nel carico e tanto più grande quanto minore la durata degli impulsi. Anche qui il rapporto dei valori è all'incirca quello esistente tra periodo e tempo di impulso; esso sarà quindi tanto più grande quanto maggiore il valore della capacità nei confronti della corrente erogata (1).

La più importante conseguenza è che la caduta di tensione, proporzionale alla corrente, diviene assai più alta di quanto non prevedibile in un avvolgimento normale, il che obbliga ad aumentare notevolmente la sezione dei conduttori, specie quando l'alimentatore debba mantenere una tensione il più possibile costante anche con carico variabile (amplificatori in classe B o C, ad esempio). E si noti che la forma impulsiva della corrente nei secondari si riflette anche sulla forma della corrente primaria in misura più o meno rilevante a seconda della percentuale di potenza erogata in forma impulsiva nei confronti di quella totale assorbita.

---

(1) Si noti, incidentalmente, che in un dato circuito rettificatore, una diminuzione della corrente richiesta dal carico produce una diminuzione del tempo di impulso proporzionalmente maggiore con conseguente ulteriore aumento della corrente di picco: in un certo senso quindi le condizioni di lavoro del rettificatore peggiorano quando lavora a carico ridotto o a vuoto. Questo giustifica il fenomeno (facile a riscontrarsi specie quando il raddrizzatore è di tipo metallico) di scariche di corrente distruttive nel raddrizzatore stesso durante il funzionamento a vuoto. Il massimo valore della corrente di picco a vuoto è fortunatamente limitato dalla resistenza interna del rettificatore stesso: ma se questo fattore non è sufficiente per una conveniente limitazione nei momenti di mancanza di carico (negli apparecchi con valvole termoioniche ad accensione indiretta durante il tempo di riscaldamento delle stesse) occorre provvedere con resistenze in serie tra rettificatore e condensatore oppure con un carico resistivo permanente che assorba una certa quantità di corrente.

Il calcolo dell'esatto valore della corrente impulsiva in un circuito rettificatore a ingresso capacitivo o comunque sede di f.c.e.m. non è semplice, dovendosi tener conto dei vari fattori che vi influiscono, tra l'altro non sempre perfettamente noti al progettista del trasformatore: in genere si può pensare ad un valore da due a cinque volte quello della corrente media nel carico.

Ad aumentare ulteriormente il valore della corrente di picco contribuisce anche il fatto, facile a verificarsi nei trasformatori radio, che un secondario alimenti un raddrizzatore ad una sola semionda: è questo il caso, sia del vero raddrizzatore ad una semionda, sia di quello controfase, essendo quest'ultimo nient'altro che il raddoppiamento del primo con due secondari distinti aventi in comune un estremo. Poichè in questi casi, durante tutto un semiperiodo la corrente è uguale a zero, detto 1 il valore efficace relativo all'intero periodo e x quello nel semiperiodo utile, dovrà verificarsi, per la definizione stessa di valore efficace:

$$1 = \sqrt{\frac{x^2 + 0}{2}}$$

donde: $x = \sqrt{2} = 1{,}416$.

Pertanto, nel caso di raddrizzamento di una sola semionda avremo nell'avvolgimento una corrente efficace 1,416 volte quella del carico e nel caso del raddrizzamento di due semionde in controfase una corrente efficace per ogni avvolgimento pari alla metà della precedente, poichè i due avvolgimenti devono erogare ciascuno la metà dell'energia richiesta dal carico. La circostanza ora illustrata va presa in considerazione sempre, anche nel caso di carico resistivo, naturalmente, mentre nel caso di carico capacitivo essa si cumula con quella della forma impulsiva.

Mi sembra utile, prima di chiudere questo paragrafo, riassumere la questione con qualche osservazione per evitare malintesi e false interpretazioni. Un trasformatore che alimenti un circuito rettificatore con entrata del filtro capacitiva lavora per impulsi di corrente di breve durata, analogamente ad una condotta d'acqua che dovesse mantenere a livello, con schizzi di breve durata e forte portata, una vasca che si svuota con regolarità.

Il fenomeno influisce principalmente sulla caduta di tensione, esigendo quindi conduttori largamente dimensionati (condotta di forte sezione, nel paragone idraulico) con conseguente aumento del volume e peso del trasformatore.

Per quel che riguarda la potenza assorbita non si ha però nessuna apprezzabile variazione rispetto al caso di correnti perfettamente sinusoidali (la nostra condotta idraulica dovrebbe erogare sempre la stessa quantità di acqua, sia che la versi con continuità che a impulsi, se deve sopperire alle perdite della vasca) eccezion fatta per l'aumento dovuto alle maggiori perdite nel rame in conseguenza dell'alto valore della corrente di picco.

In conclusione, la circostanza dell'erogazione ad impulsi va tenuta in considerazione nel dimensionamento dei conduttori, ma non nel calcolo della potenza apparente, il che in questo momento è quanto ci interessa.

Rendimento e fattore di potenza di trasformazione. Potenza assorbita al primario.

Si è visto nel capitolo terzo come ogni trasformazione sia accompagnata da perdite che non è possibile eliminare: di conseguenza la potenza reale assorbita al primario dovrà comprendere, oltre alla potenza complessivamente erogata dai secondari, anche quella perduta nella trasformazione.

Questo concetto si può esprimere anche dicendo che solo parte della potenza reale assorbita dal primario risulta utilizzabile al secondario: la percentuale è numericamente espressa da un coefficiente che prende il nome di « rendimento di trasformazione ». Detto coefficiente, che viene internazionalmente indicato con la lettera greca η, è sempre, ovviamente, minore di 1.

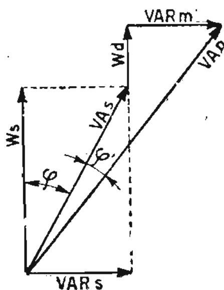


Fig. 12 - Determinazione per via vettoriale della potenza apparente primaria.

Tradotto in formule, quanto sopra detto è espresso dalla relazione:

$$W_s = \eta \, W_p \qquad \text{(II-1)}$$

Notiamo, per chiarezza, che la (II-1) si riferisce a potenze reali e non a potenze apparenti. Difatti le perdite, cui è dovuto il fatto che il rendimento sia sempre minore di 1, rappresentano potenze reali.

Desiderando scrivere una relazione analoga alla (II-1) anche per le potenze apparenti noteremo che, evidentemente, tutta la potenza apparente assorbita dal carico sul secondario dovrà riscontrarsi anche al primario: oltre ad essa sul primario saranno presenti anche la potenza perduta e la potenza reattiva richiesta per la magnetizzazione del nucleo: tutti questi elementi sommati assieme ci forniranno la misura della potenza apparente primaria.

Potremo perciò scrivere:

$$\overline{VA}_p = \overline{VA}_s + \overline{W}_d + \overline{VAR}_m \qquad \text{(II-2)}$$

relazione che è naturalmente vettoriale, non essendo gli elementi che la compongono grandezze aventi tutte la stessa fase.

La rappresentazione geometrica della precedente è data dalla fig. 12 che non abbisogna di commenti.

Supponendo, in via semplificativa,

che il carico sia tale da assorbire soltanto potenza reale, la (II-2) si modifica nella seguente relazione:

$$\overline{VA}_p = \overline{W}_s + \overline{W}_d + \overline{VAR}_m \qquad \text{(II-3)}$$

e notando che $W_s + W_d$ altro non è che $W_p = W_s / \eta$, otteniamo:

$$\overline{VA}_p = \overline{W}_s / \eta + \overline{VAR}_m \qquad \text{(II-4)}$$

La (II-3) e la (II-4) sono rappresentate graficamente nella fig. 13.

Chiamando, come indicato nella figura citata, con φ' l'angolo di sfasamento tra la W_p e la VA_p è facile ricavare che:

$$VA_p = \frac{W_s}{\eta \cdot \cos \varphi'} \qquad \text{(II-5)}$$

Il valore di cos φ' rappresenta il fattore di potenza del trasformatore e non ha nulla a che vedere con il fattore di potenza del carico, che in questo particolare caso si è supposto eguale a 1 (nessuna potenza reattiva richiesta). Cos φ' misura lo sfasamento fra tensione e corrente primaria introdotto dalla presenza del trasformatore per il solo fatto che esso abbisogna di una certa potenza reattiva per la creazione del flusso magnetico necessario al suo funzionamento.

Nel caso in cui il fattore di potenza del carico fosse minore di 1 (caso della fig. 12) il calcolo di VA_p va condotto in base alla (II-2) per via analitica o grafica (1); ma generalmente nel caso dei trasformatori radio il carico è ohmico o può approssimativamente ritenersi tale, per cui nella generalità dei casi si può adottare senz'altro la formula (II-5).

Quanto al valore pratico di cos φ' noteremo che esso è variabile da caso a caso a seconda delle caratteristiche del ferro e del valore dell'induzione magnetica; non essendo in generale conveniente istituire un calcolo a parte per determinare il valore della corrente magnetizzante (calcolo basato su dati per lo più incerti e quindi necessariamente impreciso) conviene

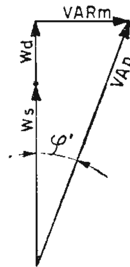


Fig. 13 - Potenza apparente primaria per carico secondario puramente resistivo.

assumere per cos φ' dei valori determinati per esperienza salvo controllare i risultati a costruzione avvenuta.

Non si dimentichi che, accanto agli inconvenienti nel progetto dei piccoli trasformatori dovuti alla poca precisione delle basi del calcolo, sta il grande vantaggio che la realizzazione di un campione costa poca fatica e spesa, in ogni caso giustificabilissima quando si tratta di perfezionare al massimo i dati di costruzione di una grande serie. In ogni modo, per induzione di ca. 10 - 11.000 linee/cm², e lamierini di qualità normale il valore di cos φ' può assumere valori di 0,88 - 0,90: naturalmente al crescere dell'induzione corrisponde una diminuzione, anche notevole, del valore di cos φ'.

(1) L'espressione generale della potenza apparente primaria è, come si può facilmente ricavare dalla risoluzione trigonometrica della figura 12:

$$VA_p = \sqrt{(VA_s + W_d \cos\varphi + VAR_m \operatorname{sen}\varphi)^2 + (VAR_m \cos\varphi - W_d \operatorname{sen}\varphi)^2}$$

in cui si tien conto del fattore di potenza cos φ del carico e di tutti gli altri elementi del problema.

RELAZIONE FRA POTENZA E DIMENSIONI

Relazioni generali fra elementi elettrici e geometrici di un trasformatore.

Prima di addentrarci nello studio del vero e proprio calcolo del trasformatore è necessario formarsi alcune nozioni fondamentali sulle relazioni esistenti fra la potenza di un avvolgimento facente parte di un determinato trasformatore e le dimensioni geometriche dello stesso.

Nel trattare il fenomeno generale della trasformazione abbiamo visto che base del funzionamento di questa macchina elettrica è il fatto che una spira, attraversata da un flusso variabile, diviene sede di una f.e.m. e che quest'ultima, se la spira è chiusa su un circuito di carico provoca una certa corrente che percorre tanto il carico quanto la spira stessa. Il flusso che attraversa la spira è, per una data induzione, proporzionale in modo diretto all'area *Ar* circoscritta dalla spira (se immaginiamo che essa sia avvolta direttamente sul nucleo magnetico) mentre la corrente che questa spira potrà sopportare risulta proporzionale alla sezione *S* del filo con cui essa è costituita. Considerando che la potenza apparente che la spira può fornire è data dal prodotto della f.e.m. (si trascura la caduta di tensione, per il momento) di cui è sede moltiplicata per la corrente che la percorre, e ricordando quanto detto più sopra, potremo esprimere in termini matematici questa potenza con la relazione:

$$VA'_e = E_e \,.\, I = Ar \times S \qquad \text{(II-6)}$$

Ora, l'area abbracciata dalla spira è in certo modo a sua volta proporzionale al quadrato della sua lunghezza (per la spira quadrata, che rappresenta il caso più favorevole è infatti $Ar = (L/4)^2$); onde potremo scrivere ancora:

$$VA'_e = k \,.\, L^2 . \, S = k \,.\, L \,.\, L \,.\, S = \\ = k \,.\, Vl \,.\, L \qquad \text{(II-7)}$$

essendo evidentemente $L \,.\, S$ pari al volume Vl della spira.

La (II-7) ci dice essere la potenza propria di una spira proporzionale al suo volume ed alla sua lunghezza; il coefficiente k dipenderà dall'induzione specifica nel ferro ammessa nel calcolo, dalla corrente specifica nel conduttore e inoltre dalla forma geometrica della spira stessa (rotonda, quadra, rettangolare). Una deduzione incidentale che si può trarne è che, a parità di volume e di coefficiente k, la potenza di cui è sede una spira sarà tanto più grande quanto più essa sarà sviluppata in lunghezza. Nei trasformatori grandi o grandissimi, con notevole sviluppo della spira media, si avranno pertanto potenze per unità di volume maggiori che non nei trasformatori di piccole dimensioni.

Ciò che però ci interessa ora di stabilire, e che consegue dalle stesse considerazioni ora svolte, è questo: in un trasformatore costruito con un certo circuito magnetico e quindi con una lunghezza di spira determinata, essendo il termine L^2 da considerarsi costante per tutte le varie spire che lo compongono, la potenza di ogni spira risulta proporzionale alla sezione della spira stessa, secondo il coefficiente k di cui sopra. E se nella finestra del lamierino di cui il circuito magnetico è composto possono essere sistemate n spire di sezione S, la potenza complessiva dell'avvolgimento risulterà proporzionale a nS, ovverossia alla totale sezione di rame installata.

Volt/Spira.

Per poter dare alla (II-7) del paragrafo precedente una forma più precisa, capace di essere sviluppata numericamente, dovremo introdurre in essa l'espressione della f.e.m. che si sviluppa in una spira in funzione del valore delle grandezze elettriche e magnetiche che su essa influiscono. Ma la f.e.m. sviluppata in una spira sottoposta a flusso alternativo è data dalla già nota formula:

$$E_e = 4{,}44 \,.\, f \,.\, \Phi \; 10^{-8} \text{ volt} \qquad \text{(II-8)}$$

ove le diverse lettere hanno il solito significato.

E se B è l'induzione magnetica e s_{fe} la sezione netta del ferro percorso dal flusso, potremo scrivere anche:

$$E_e = 4{,}44 \,.\, f \,.\, B \,.\, s_{fe} \; 10^{-8} \qquad \text{(II-9) (1).}$$

(1) Nel calcolo pratico, anzichè determinare la f.e.m. unitaria in V/spira risulta più comodo determinare la quantità inversa, le spire/volt.

Ovviamente si ha, dalla (II-9):

$$\text{spire/volt} = \frac{10^8}{4{,}44 \,.\, f \,.\, B \,.\, s_{fe}} \qquad \text{(II-9 bis)}$$

Lo sviluppo numerico di questa formula, per diversi valori dei termini in essa contenuti, è rappresentato dal nomogramma N° I il cui uso è spiegato in calce allo stesso.

Potenza virtuale.

Si è detto essere la potenza apparente di una spira espressa dal prodotto della sua f.e.m. per la corrente che la percorre: il primo di questi termini ci è dato dalla (II-9) mentre notiamo che la corrente potrà essere espressa dal prodotto $S \cdot J$ dove J è la corrente specifica nel conduttore.

Scriveremo quindi:

$$VA'_e = E_e \cdot I = = 4{,}44\, f \cdot B \cdot s_{fe} \cdot S \cdot J \cdot 10^{-8} \text{ VA} \quad \text{(II-10)}$$

in cui f sia in Hz, B in linee/cm², S in mm², s_{fe} in cm² e J in A/mm².

Se invece della potenza di una spira vorremo definire quella di n spire di eguale sezione, non avremo che a moltiplicare per n l'espressione ora trovata e scrivere pertanto:

$$VA' = 4{,}44 \cdot n \cdot f \cdot B \cdot s_{fe} \cdot S \cdot J \cdot 10^{-8} \text{ VA} \quad \text{(II-11)}$$

e notando che il prodotto $n \cdot S$ altro non è che la totale sezione netta dell'avvolgimento S_{cu}:

$$VA' = 4{,}44 \cdot f \cdot B \cdot J \cdot S_{cu} \cdot s_{fe} \cdot 10^{-8} \quad \text{(II-12)}$$

In questa relazione, di cui vedremo appresso l'importanza per la determinazione delle dimensioni geometriche del trasformatore, noi chiameremo VA' « potenza virtuale » del trasformatore quando per S_{cu} sia assunta l'intera sezione di rame installata, senza riguardo al fatto che essa si riferisca contemporaneamente ad avvolgimenti primari o secondari.

Concetto geometrico della potenza virtuale.

Si osservi anzitutto che il termine VA' non rappresenta affatto la potenza del trasformatore nel senso con cui essa è in genere ufficialmente definita ovverossia come potenza apparente erogabile dal secondario: lo sarebbe soltanto (sempre prescindendo dalla caduta di tensione) qualora per S_{cu} si assumesse il valore relativo al o agli avvolgimenti secondari e questi erogassero corrente per tutto il ciclo di alternanza. Viceversa, come

si è già detto, per S_{cu} noi intenderemo sempre la complessiva sezione di rame esistente nel trasformatore senza riguardo all'avvolgimento cui appartenga. Entità quindi assai più grande della potenza secondaria, il termine VA', che potremmo anche chiamare « potenza geometrica » in quanto il suo valore è in diretta relazione con le dimensioni del ferro e del rame. Le applicazioni pratiche chiariranno poi meglio questo concetto.

La (II-12) può servire a determinare, dati gli elementi geometrici S_{cu} e s_{fe} e quelli elettrici f, B ed J, la potenza virtuale che con questi dati può essere realizzata, oppure a ricavare uno dei cinque termini citati, una volta noti o predeterminati gli altri. Vedremo fra breve l'uso di questa formula ed i suoi sviluppi.

Notiamo intanto che, agli effetti della potenza virtuale, i cinque parametri f, B, J, S_{cu}, s_{fe} assumono tutti la stessa importanza, essendo la VA' direttamente proporzionale a ciascuno di essi. Però, mentre i due elementi geometrici S_{cu} ed s_{fe} possono evidentemente essere accresciuti quanto si voglia, i tre parametri elettrici non possono essere fissati ad arbitrio o quantomeno ciò è possibile solo entro certi limiti.

La frequenza, ad esempio, è un fattore che ci viene imposto e che non possiamo modificare; induzione e corrente specifica possono invece essere scelti — sino a un certo punto — a piacere, ma hanno dei valori massimi che non possono essere superati senza compromettere l'esistenza del trasformatore per eccessivo riscaldamento. In genere, salvo che per costruzioni speciali, si adottano senz'altro i valori massimi ammissibili che variano all'incirca tra 9000 e 13.000 linee/cm^2 per B e 2,5-4 A/mm^2 per la corrente specifica.

Per un determinato tipo di trasformatore il costruttore adotta quindi dei valori prefissati per f, B ed J che sono perciò da considerarsi delle costanti del calcolo. Sotto questo punto di vista la (II-12) diviene soltanto una relazione tra VA' da una parte e S_{cu}, s_{fe} dall'altra e tale la considereremo d'ora innanzi.

Ad esempio, per valori di: $f = 42$ (valore generalmente adottato nei trasformatori destinati a lavorare su reti diverse, essendo il più basso riscontrabile in Italia), $B = 10.000$, $J = 3$, la (II-12) si semplifica nella:

$$VA' = 5\ S_{cu} \cdot s'_{fe} \qquad \text{(II-13)}$$

in cui s'_{fe} ($= s_{fe}/0,9$) è la sezione lorda del circuito magnetico. Se tanto S_{cu} che s_{fe} si esprimono in cm^2, VA' risulta in VA.

Espressioni analoghe alla (II-13) in cui varierà soltanto il coefficiente numerico possono essere approntate, di volta in volta o a priori, per diversi valori dei fattori B, J, f, e usate come comode formule pratiche per il calcolo.

Vediamo ora come, una volta stabiliti i dati di prestazione di un trasformatore, si possa calcolarne il valore di VA' corrispondente; questa ricerca è sommamente interessante e utile, specie nei piccoli trasformatori, e ne vedremo ben presto il perchè.

Rapporto fra potenza secondaria e potenza virtuale.

In un trasformatore teorico senza perdite, il valore di VA' dovrebbe essere naturalmente pari al doppio di quello della potenza secondaria, in quanto al secondario va accoppiato un primario di potenza esattamente eguale. Questo caso però si verifica, con qualche approssimazione, soltanto in grandissimi trasformatori di rendimento molto vicino all'unità: nel caso nostro di piccoli trasformatori cui particolarmente ci riferiamo, il caso si presenta ben diverso e non potremo assolutamente fare a meno di tener conto del fatto che la potenza del primario, e quindi il suo ingombro, risulta notevolmente maggiore di quella secondaria. Poichè la potenza primaria è definita dalla relazione:

$$VA_p = VA_s/\eta \cos \varphi'$$

che abbiamo determinata nel precedente capitolo, la generica espressione della potenza virtuale sarà nel nostro caso:

$$\begin{aligned} VA' &= VA_s + VA_p = \\ &= VA_s + VA_s/\eta \cos \varphi' = \\ &= VA_s \,(1 + 1/\eta \cos \varphi') \quad \text{(II-14)} \end{aligned}$$

Ma dobbiamo tener conto anche di un'altra circostanza, finora non considerata: nella quasi totalità i trasformatori radio e simili vengono costruiti per l'uso universale su reti di alimentazione a diversa tensione; il che obbliga a predisporre il primario con diverse sezioni di cui talune inutilizzate o utilizzate solo parzialmente rispetto alle loro possibilità; onde, mentre la potenza primaria non varia, aumenta però l'ingombro relativo, per il minor sfruttamento dell'avvolgimento, secondo un coefficiente k'_p il cui valore numerico nei diversi casi apprenderemo a determinare più tardi.

Chiameremo k'_p « coefficiente di ingombro primario » e lo definiremo come il rapporto esistente fra la sezione di rame occorrente per il primario in questione e quella di un primario a tensione unica.

Con quest'ultima osservazione la (II-14) si modifica nella:

$$VA' = VA_s \left(1 + \frac{k'_p}{\eta \cos \varphi'}\right) \quad \text{(II-15)}$$

che rappresenta la formula più generale per la determinazione della potenza virtuale corrispondente ad un trasformatore quando sia nota la potenza secondaria e i fattori η, $\cos \varphi'$ e k'_p.

Precedendo un poco le conclusioni dei capitoli seguenti diremo che,

mentre $\eta \cos \varphi'$ per piccolissime costruzioni può assumere valori anche inferiori a 0,66, k'_p in taluni casi si avvicina alla cifra 2 onde ne risulta che la potenza virtuale può risultare pari a 4 e più volte la potenza secondaria e cioè più che doppia di quella teorica di un trasformatore perfetto e con primario a tensione unica.

Di qui l'importanza della determinazione di VA' essendo la potenza secondaria un elemento imperfetto per la determinazione delle corrette dimensioni geometriche; difatti a parità di potenza secondaria si possono avere potenze virtuali corrispondenti assai diverse a seconda delle condizioni elettriche imposte dai dati del problema.

DIMENSIONAMENTO GEOMETRICO

Problemi di dimensionamento nel progetto di un trasformatore.

Esaurite le considerazioni preliminari finora svolte possiamo ora addentrarci nel problema vero e proprio del calcolo del trasformatore.

Come si è visto nell'esame generale del fenomeno della trasformazione, base della costruzione pratica è un circuito magnetico costituito dalla sovrapposizione di lamierini tutti eguali fra loro fino a costituire un pacco di un certo spessore. Entro questo circuito si incanalerà il flusso magnetico prodotto dalla corrente primaria.

Va notato subito che nessuna esigenza teorica prescrive una esatta correlazione tra le dimensioni di questo pacco magnetico e la potenza secondaria o la potenza virtuale; ciò è dovuto al fatto che, perchè il trasformatore funzioni è sufficiente che il prodotto del numero di spire di un avvolgimento per il flusso magnetico (a parte i coefficienti e le costanti) sia tale da fornire le f.e.m. richieste; e un prodotto può essere ottenuto con diversissimi rapporti fra i due fattori. In parole più semplici, noi potremo costruire un trasformatore con piccolo flusso e moltissime spire oppure con grande flusso e poche spire: e poichè dire flusso vuol dire all'incirca sezione del ferro (essendo l'induzione magnetica limitata nei suoi valori massimi) se ne trae la conseguenza che uno stesso trasformatore può essere senz'altro progettato con rapporti ferro-rame diversissimi, pur ottenendosi sempre pressapoco lo stesso risultato. Evidentemente però, fra le infinite soluzioni possibili, ve ne sarà una più conveniente delle altre, onde è logico domandarsi come sia possibile determinarla. Occorre distinguere subito che cosa si intenda con la locuzione « soluzione più conveniente » dato che, caso per caso, la convenienza potrà essere intesa in modo diverso.

In generale per convenienza si intende la convenienza economica; ma nessuno vieta di pensare che in certe circostanze la convenienza possa consistere nel miglior rendimento, nella minima caduta di tensione, ecc.

Per ognuno dei singoli casi esiste

una proporzione ferro-rame che soddisfa ai requisiti richiesti: ed esistono anche i sistemi per determinare queste proporzioni; generalmente però l'esigenza più ricercata è quella del minimo costo e di questo problema tratteremo ampiamente più tardi; va detto subito però che la sua esatta soluzione è tutt'altro che rapida e facile e coinvolge una serie di elementi che finora non abbiamo considerato.

Non potendo pertanto far ricorso a formule complesse e calcoli complicati che fra l'altro sarebbero fuori posto in questo caso, in un primo tempo ci riferiremo ad una formula empirica molto semplice e molto nota per la determinazione della sezione di ferro occorrente. La formula è la seguente:

$$s_{fe} = k \sqrt{VA'} \qquad \text{(II-16)}$$

ove le notazioni hanno il noto significato. k è un coefficiente empirico che, per la sua dipendenza da molti fattori, è difficile determinare in modo che si adatti alla generalità dei casi; il valore 1 può essere assunto come conveniente se si ricerca la massima economia; si noti però che esso può variare a seconda del tipo di trasformatore e soprattutto del rapporto contingente fra il prezzo dei due principali componenti: ferro e rame.

I lamierini usati nella costruzione dei piccoli trasformatori hanno sempre la cosiddetta forma « a mantello » (fig. 14), e sono caratterizzati dalle tre dimensioni A, B, L indicate nella figura stessa. Leggere variazioni nelle proporzioni indicate e particolarmente nel rapporto fra il nucleo centrale e le gambe laterali possono anche riscontrarsi in pratica, ma senza grandi scostamenti dal tipo classico. La sezione di ferro determinata con la (II-16) viene realizzata sovrapponendo una quantità di lamierini tale che si abbia:

$$s_{fe} = k_{fe} \, . \, L \, . \, H \qquad \text{(II-17)}$$

Il coefficiente k_{fe}, sempre minore di 1, si chiama « coefficiente stipamento lamierini » e tiene conto degli inevitabili spazi d'aria e soprattutto dell'isolamento esistente fra lamierino e lamierino per cui soltanto una parte dell'altezza H risulta costituita da materiale magnetico. Il valore pratico di tale coefficiente varia in relazione allo spessore percentuale dell'isolamento nei confronti dello spessore del lamierino: onde a lamierini sottili spetta in genere un coefficiente più basso: in media il valore di k_{fe} risulta compreso fra 0,85 e 0,92.

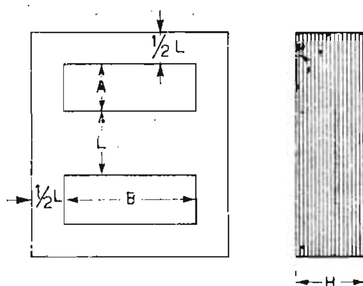


Fig. 14 - Nucleo magnetico per trasformatori monofasi con lamierini a mantello.

Lo spazio rettangolare vuoto compreso dalle dimensioni A e B prende il nome di « finestra » del lamierino ed in essa deve trovar posto l'avvolgimento completo: onde il problema principale, una volta determinate in un modo o nell'altro le dimensioni del circuito magnetico, è appunto

quello di verificare col calcolo che la quantità di rame occorrente possa trovar posto nello spazio anzidetto. Il problema è quindi squisitamente geometrico e la (II-12) precedentemente determinata è la formula che ci occorre per la sua risoluzione. Se la forma della sezione dei fili che compongono l' avvolgimento fosse quadra o rettangolare e non esistesse spessore di isolamento tra di essi e tra l'avvolgimento e il ferro, la sezione totale S_{cu} di rame contenibile nella finestra sarebbe senz'altro eguale all'area $A \times B$ della finestra stessa; ma nella realtà la sezione del filo ha forma rotonda ed esiste un isolamento attorno ad esso oltre ad un isolamento tra strato e strato di avvolgimento e fra questo e il ferro; tutte cose che fanno sì che la sopraddetta sezione S_{cu} risulti notevolmente minore del prodotto $A \times B$. Chiameremo « coefficiente di riempimento finestra » e lo indicheremo con k_f il rapporto fra la sezione di rame S_{cu} effettivamente installabile e la superficie $A \times B$ della finestra:

$$k_f = S_{cu}/A . B \qquad \text{(II-18)}$$

Il valore pratico di k_f dipende da numerosissimi fattori come spessore dell'isolamento dei fili rispetto al loro diametro, spessore degli isolanti usati fra strato e strato, prese più o meno numerose da fare, tipo di avvolgimento con o senza sponde, precisione della macchina avvolgitrice ed abilità dell'operatore. Naturalmente, piccoli avvolgimenti con fili molto sottili comportano valori di k_f più bassi che non avvolgimenti grossi eseguiti con fili di diametro relativamento elevato; per cui in definitiva si può dire soltanto che il valore pratico di detto coefficiente oscilla fra 0.22 e 0,38: il valore 0,2 può anche essere rilevato in avvolgimenti piccoli eseguiti con fili dell'ordine del decimo di millimetro, mentre il valore 0,4 può considerarsi come un limite eccezionale ed è realizzabile soltanto in particolari casi, con costruzioni molto accurate, basso isolamento, fili di dimensioni relativamente grandi. A questo riguardo è compito specifico del costruttore di stabilire, mediante controllo su avvolgimenti già eseguiti, quale sia il valore più confacente caso per caso in relazione al suo sistema di costruzione; e questa ricerca gli sarà particolarmente preziosa in calcoli di orientamento.

Verifica delle condizioni di ingombro.

In base alle considerazioni precedentemente svolte, potremo scrivere, chiamando S_f il prodotto $A . B$:

$$VA' = 4{,}44\, f . B . J . k_f . S_f . k_{fe} . s'_{fe} . 10^{-8} \qquad \text{(II-19)}$$

la quale è semplicemente una modifica della (II-12) in cui all'espressione S_{cu} si è sostituita la relazione equivalente $k_f . S_f$ e a s_{fe} quella $k_{fe} . s'_{fe}$. Per un certo lamierino ed un determinato spessore di pacco s'_{fe} ed S_f

risultano perfettamente definiti; onde la potenza virtuale contenibile in quel pacco di lamierini risulta funzione soltanto di f, B ed J oltre che di k_{fe} e k_f.

Osservazioni sui primi tre di questi parametri sono già state svolte precedentemente; quanto a k_{fe} e k_f si sono dati i valori limite praticamente realizzabili. Notiamo che, nella pratica del calcolo, ogni progettista adotta, salvo casi eccezionali, dei valori fissi per B ed J a seconda del proprio personale orientamento circa la qualità ed il costo; quanto ad f si tratta di un dato del calcolo che è quello che è.

I valori di k_{fe} e k_f varieranno a seconda del tipo di trasformatore da realizzarsi e del lamierino impiegato; ma anch'essi potranno, almeno in prima approssimazione, essere prefissati in cifre medie secondo la pratica del progettista. Ne consegue che è possibile, con questi elementi, istituire, per ogni modello di lamella, delle tabelle in cui a diversi spessori del pacco corrispondano le relative potenze virtuali che con questo pacco possono essere realizzate.

A titolo di esempio riportiamo qui appresso la tabella relativa al lamierino illustrato in fig. 15. I valori delle potenze virtuali sono stati calcolati a mezzo della (II-19) per diversi valori di k_f e di H ponendo per gli altri termini: $B = 10.000$, $J = 3$, $k_{fe} = 0{,}90$ e $f = 42$.

Oltre alla potenza virtuale sono comprese nella tabella anche altre grandezze (peso del ferro, lunghezza della spira media) che riescono utili nello sviluppo pratico del calcolo. Il peso del ferro è ottenuto naturalmente ricavando prima la superficie del lamierino, quindi il volume ed il peso corrispondente (peso specifico 7,8 gr/cm^3); la lunghezza della spira media è calcolata in base alla formula:

$$L_m = 2\,L + 2\,H + \pi\,B \qquad \text{(II-20)}$$

la cui dimostrazione è affidata all'esame della fig. 16 che non abbisogna di commenti.

Valore di k_f	unità di misura	POTENZE VIRTUALI PER H =				
		2 cm.	3 cm.	4 cm.	5 cm.	6 cm.
0.25	VA	106	159	212	265	318
0.275	VA	116	175	233	292	350
0.30	VA	127	191	255	318	382
0.325	VA	138	206	275	345	412
0.35	VA	148	223	296	370	446
0.375	VA	159	238	318	397	476
P_{fe}	Kg.	1,015	1,525	2,030	2,540	3,050
L_m	cm.	16,3	18,3	20,3	22,3	24,3

Nota: peso netto del ferro calcolato per $k_{fe} = 0{,}90$.

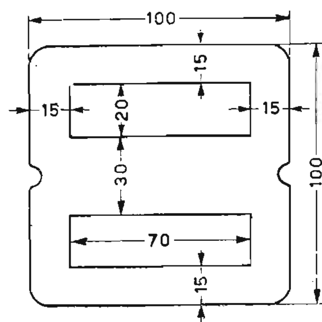


Fig. 15

Fac-simili della citata tabella, per lamierini di tipo diverso ed eventualmente con altri valori dei termini elettrici e geometrici contenuti nella (II-19), potranno essere facilmente istituiti dai progettisti secondo le proprie necessità e riusciranno di valido aiuto nell'impostazione del calcolo per poter prevedere con immediatezza quale sia il tipo di lamierino e il relativo spessore di pacco da adottarsi nella realizzazione di un determinato trasformatore.

Sempre in tema di orientamento generale, quando non si voglia eseguire a priori il lavoro tabellare precedentemente indicato o si abbia a che fare con lamierini di tipo imprevisto può riuscire utile ridurre la (II-19) ad una espressione molto semplice, introducendovi valori predeterminati per le variabili in essa contenute, eccezion fatta per s_{fe} ed S_f. A solo titolo di esempio, effettuiamo l'operazione indicata ponendo, come al solito: $B = 10.000$, $J = 3$, $f = 42$, $k_f = 0{,}3$, $k_{fe} = 0{,}9$. In conseguenza la (II-19) diviene:

$$VA' = 4{,}44 \times 42 \times 10.000 \times 3 \times \times 0{,}3 \times 0{,}9 \times S_f \times s_{fe} \times 10^{-8} = = 0{,}015\ S_f \,.\, s_{fe} \qquad \text{(II-21)}$$

In questa formula ed altre dello stesso genere VA' risulta in VA se S_f è espressa in mm² e s_{fe} in cm². Per ragioni di omogeneità conviene però

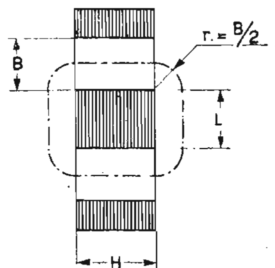


Fig. 16 - Determinazione della lunghezza della spira media in un trasformatore.

esprimere ambedue le aree in cm²: con ciò la (II-21) assume la forma:

$$VA' = 1{,}5\ (A \times B \times L \times H) \qquad \text{(II-22)}$$

in cui A, B, L, H hanno il ben noto significato e sono tutte espresse in cm.

Dando altri valori alle variabili f, B, J, k_{fe}, k_f si otterranno naturalmente altre espressioni analoghe alla (II-22) da cui differiranno soltanto per il valore del coefficiente numerico.

Riepilogo.

Per chiarezza e comodità conviene riepilogare quanto determinato e calcolato in questo e nel precedente capitolo.

I risultati più salienti possono essere condensati nelle seguenti formule:

A) Espressione generale della potenza virtuale che può essere realizzata con un pacco di lamierini di sezione lorda s'_{fe} e finestra di sezione S_f:

$$VA' = 4{,}44 \,.\, f \,.\, B \,.\, J \,.\, k_f \,.\, k_{fe} \,.\, S_f \,.\, s'_{fe} \,.\, 10^{-8}$$

B) Potenza virtuale di un trasformatore avente una potenza secondaria totale VA_s:

$$VA' = VA_s \left(1 + \frac{k_n}{\eta \cos \varphi'}\right)$$

C) Numero di spire/volt in un pacco di sezione lorda s'_{fe}:

$$\text{spire/volt} = \frac{10^8}{4{,}44 \cdot f \cdot B \cdot k_{fe} \cdot s'_{fe}}$$

D) Lunghezza di spira media:

$$L_m = 2\ (\mathrm{L} + \mathrm{H}) + \pi\, \mathrm{B}$$

formule che rappresentano il corredo principale del calcolatore.

Si sono inoltre indicati i seguenti valori pratici per i diversi elementi del calcolo:

1°) Induzione magnetica: da 9000 a 13.000 linee/cm² (0,9 - 1,3 Wb/m²): il valore 10.000 da assumersi come valore prudenziale o per costruzioni di ottima qualità.

2°) Corrente specifica: da 2,5 a 4 A/mm² (i valori più alti per i trasformatori più piccoli). La cifra di 3 A/mm² è quella raccomandabile per un buon progetto.

3°) Coefficiente di stipamento lamierini k_{fe}: tra 0,85 e 0,92 (media 0,90).

4°) Coefficiente di riempimento finestra k_f: variabile tra 0,22 e 0,38: in trasformatori di alimentazione tipo radio normali si riscontrano valori medi di 0,28 - 0,32.

L'AVVOLGIMENTO PRIMARIO

Calcolo delle correnti primarie.

Determinata, secondo le formule già viste, la potenza apparente primaria VA_p, il calcolo della corrente assorbita relativamente ad una certa tensione di alimentazione V_p si effettua immediatamente con la semplicissima relazione:

$$I_p = VA_p / V_p \qquad \text{(II-23)}$$

Nel caso, quasi generale, che l'alimentazione debba essere prevista per diverse tensioni, il conto va effettuato separatamente per ciascuna di esse, ottenendosi così una serie di valori I_{p1}, I_{p2}, ecc.

Primari multipli a corrente specifica costante.

Nel caso di primari a prese multiple la corrente primaria, come la (II-23) ci mostra, decresce con l'aumentare della tensione; ne viene di conseguenza che la sezione del filo **relativa alle** varie prese del primario dovrà essere diversa se si vuole che la corrente specifica sia la stessa in tutte le zone del primario. Consideriamo infatti, per maggiore chiarezza, la fig. 17 che schematizza un primario a diverse prese, corrispondenti alle tensioni indicate. Le correnti corrispondenti alle 4 tensioni previste sono pure indicate nella stessa figura: il tratto di avvolgi-

mento che va dalla presa 0 alla presa 120 dovrà quindi essere dimensionato per la corrente di 1,66 A, quello tra 120 e 140 per 1,43 A, ecc.

La corrente specifica prefissata ed in base alla quale avremo effettuato il calcolo delle diverse sezioni del filo si verificherà però, in una certa condizione di alimentazione, soltanto per il tratto compreso fra la presa utilizzata e la precedente: i tratti al disopra rimarranno inoperosi; quelli al disotto sopporteranno una corrente specifica minore dato che sono stati calcolati per una corrente maggiore. Questa sovrabbondanza di dimensionamento, d'altra parte inevitabile, fa sì che il primario a prese multiple richieda un peso di rame e uno spazio relativo ben maggiore di quello occorrente per un primario a tensione unica; basta infatti pensare che, nel caso in esame, tutta la parte di avvolgimento al disopra della presa 120 V rappresenta una aggiunta allo stretto necessario.

Un primario a tensione unica, per una data potenza primaria, richiede uno spazio che è praticamente indipendente dalla tensione per cui esso è costruito: per convincersene basta pensare che, mentre il numero delle spire aumenta proporzionalmente all'aumento di tensione si ha però una diminuzione, nella stessa proporzione, della sezione del filo per la minore corrente che lo percorre, onde il prodotto spire × sezione unitaria resta inalterato e con esso l'ingombro.

Fatta questa considerazione, è facile verificare che tutte le zone aggiunte al primario base comportano un ingombro ulteriore che sta con quello del primario base nel rapporto $V_n - V_{n-1} / V_n$ essendo V_n la tensione di una generica presa e V_{n-1} quella della presa immediatamente precedente.

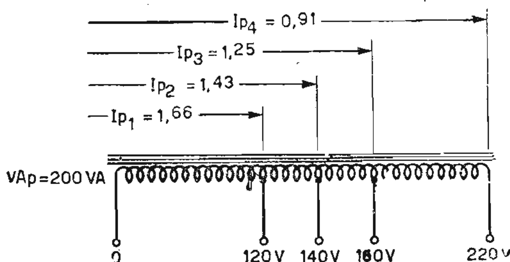


Fig. 17 - Primario a tensioni multiple e correnti corrispondenti alle varie prese.

Così, sempre riferendoci al caso già citato, la zona 140 - 160 V comporta un ingombro pari a $160 - 140 / 160 = 20 / 160 = 0{,}125$ volte lo spazio occorrente per la zona 0-120 V.

E' facile ora dedurre una formula generale per il calcolo dell'ingombro totale di un primario multiplo nei confronti di quello a tensione unica: detto Q_1 quest'ultimo e Q_m il primo si avrà:

$$Q_m = Q_1 \left(1 + \Sigma_2^n \frac{V_n - V_{n-1}}{V_n}\right) \quad \text{(II-24)}$$

convenendo contrassegnare con l'indice 0 l'inizio dell'avvolgimento e con

1,2, ... n le varie prese. Il termine:

$$\frac{Q_m}{Q_1} = 1 + \Sigma^n \frac{V_n - V_{n-1}}{V_n}$$

rappresenta quello che chiameremo « coefficiente di ingombro primario » e lo indicheremo convenzionalmente con k_p.

Nella tabella N° II si potranno trovare, per comodità di calcolo, i coefficienti già conteggiati per i primari a prese multiple più in uso. Nella stessa tabella sono indicati i rapporti S_n/S_1 della sezione del filo occorrente in ogni zona rispetto a quella del filo impiegato nella prima zona base.

Calcolo dei primari a prese multiple con dissipazione costante.

Si è parlato prima del calcolo delle sezioni del filo per il primario in base alle relative correnti e ad una corrente specifica predeterminata. Si è chiamato questo sistema « a corrente specifica costante » sebbene ciò non sia perfettamente esatto. Si è anche determinato quale fosse il coefficiente d'ingombro dei diversi primari più in uso; si è visto come tali coefficienti assumano valori notevoli (fino a 2) e come quindi le prese multiple nel primario importino un ingombro ed un peso di rame talvolta eccessivo ed incompatibile con lo spazio disponibile o con i limiti di costo desiderati.

Agli svantaggi puramente economici sopraddetti si può aggiungerne un altro di carattere elettrico. Esso è il seguente.

Dato che le varie sezioni del primario sono calcolate per la corrente massima che in esse può circolare, quando il trasformatore è collegato ad una presa qualsiasi, tutte le sezioni corrispondenti a prese di tensione inferiore risultano percorse da correnti minori di quelle per cui sono calcolate. Ciò porta come conseguenza che la perdita nel rame del primario non è costante, ma varia diminuendo man mano che vengono utilizzate prese a tensione crescente. Poichè le cadute di tensione negli avvolgimenti secondari variano anche in rapporto con le perdite nel rame primario, si avrà come altra sgradita conseguenza che le tensioni secondarie varieranno esse pure a seconda della presa del primario utilizzata. Allo scopo di chiarire le idee facciamo un esempio: un trasformatore di potenza apparente primaria di 75 VA, avvolto su un nucleo di 40 $\times$ 30 mm con 4,5 spire/volt, una densità specifica nel rame di 3 A/mm^2 ed una spira

media presunta di cm. 17. Le tensioni previste siano: 110-125-140-160-220-280 V. Raccogliamo i dati relativi al calcolo nella seguente tabella:

fig. 18 in cui R_1, R_2, R_3 ecc. sono le resistenze parziali delle successive sezioni.

Se I_1 è la corrente corrispondente

Tensione V.	*Spire* N°	*Corrente* Amp.	*∅ filo* mm.	*Lunghezza avvolgim.* m	*Resist. sezione* Ω	*Resist. progress.* Ω	*Perdita nel rame* W
110	495	0,68	0,55	84	6,4	6,4	2,95
125	+ 67	0,60	0,50	11,4	1	7,4	2,65
140	+ 68	0,53	0,50	11,4	1	8,4	2,35
160	+ 90	0,47	0,45	15,3	1,7	10,1	2,2
220	+270	0,34	0,38	46	7,3	17,4	2,0
280	+270	0,27	0,33	46	9,7	27,1	2,0

(Si noti che nel calcolo si è tenuto conto di una lunghezza media della spira costante ciò che non è esatto in realtà; l'approssimazione è però sufficiente).

Come si vede la variazione di perdita non è notevolissima, ma esiste: se la si potrà eliminare sarà bene farlo. Ad ogni modo la considerazione più importante è sempre quella dell'ingombro e, in relazione, del costo; pertanto ci si domanda: è possibile ridurlo senza pregiudizio del buon funzionamento del trasformatore? Effettivamente è possibile, qualora si calcolino le sezioni del filo del primario, non in base ad una corrente specifica costante, ma in modo che le perdite nel rame rimangano costanti qualunque sia la presa utilizzata.

Vediamo come si possa impostare un siffatto calcolo tenendo presente quanto detto sopra. Se lo sviluppo matematico potrà per taluno riuscire noioso e difficile, non c'è che da saltarlo a piè pari ed arrivare alle formule definitive.

Si consideri l'avvolgimento primario schematicamente rappresentato in all'utilizzazione sulla presa 0 - 1 la perdita relativa nel rame è:

$$W_{d1} = R_1 I_1^2 \qquad \text{(II-25)}$$

Ci proponiamo di mantenere costante questa perdita anche quando vengano utilizzate prese superiori: porremo quindi:

$$R_1 I_1^2 = W'_d = \text{cost.} \qquad \text{(II-26)}$$

Consideriamo ora che cosa avviene quando passiamo dall'utilizzazione su

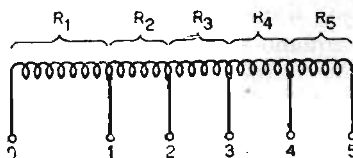


Fig. 18 - Avvolgimento primario a 5 prese e resistenza dei vari tratti.

una generica presa n-1 alla successiva presa n. Se la perdita nel rame che si aveva con la presa n-1 corrispondente alla tensione V_{n-1} era, come stabilito, $W'_d = R_1 I_1^2$, utilizzando ora la

presa n corrispondente alla tensione V_n si avrà una diminuzione di corrente da I_{n-1} a I_n e tutta la parte dell'avvolgimento fino alla presa n-1 dissiperà ora una potenza minore, nel rapporto dei quadrati delle due correnti suddette:

$$W_{dn-1} = W'_d \frac{I_n^2}{I_{n-1}^2} = R_1 I_1^2 \frac{I_n^2}{I_{n-1}^2} \tag{II-27}$$

La differenza rispetto alla perdita fissata W'_d è:

$$W_{dn} = W'_d - W_{dn-1} = W'_d \left(1 - \frac{I_n^2}{I_{n-1}^2}\right)$$

onde:

$$W_{dn} = R_1 I_1^2 \left(\frac{I_{n-1}^2 - I_n^2}{I_{n-1}^2}\right) \tag{II-28}$$

Il termine W_{dn} rappresenta la parte di potenza che dovrà essere dissipata nella sezione di avvolgimento compresa fra la presa n-1 e la presa n, la cui resistenza R_n dovrà quindi essere tale da soddisfare la relazione:

$$R_n I_n^2 = R_1 I_1^2 \left(\frac{I_{n-1}^2 - I_n^2}{I_{n-1}^2}\right) \tag{II-29}$$

da cui otteniamo:

$$\frac{R_1}{R_n} = \frac{1}{I_1^2} \frac{I_n^2 \cdot I_{n-1}^2}{I_{n-1}^2 - I_n^2} \tag{II-30}$$

Relazione che ci indica quale debba essere il rapporto fra la resistenza della sezione ennesima e la resistenza della 1ª sezione, in funzione delle correnti relative, perchè sia soddisfatto il presupposto di perdita costante nel rame. La (II-30) non è però di pratica utilizzazione e sarà assai più comodo avere una relazione addirittura fra le sezioni (o diametri) dei fili da usarsi nelle varie zone in funzione delle tensioni alle quali queste sezioni corrispondono. A questo arriviamo con le seguenti trasformazioni:

$$\frac{R_1}{R_n} = \frac{1}{I_1^2} \frac{1}{\dfrac{I_{n-1}^2 - I_n^2}{I_{n-1}^2 \cdot I_n^2}} =$$

$$= \frac{1}{I_1^2} \frac{1}{\dfrac{1}{I_n^2} - \dfrac{1}{I_{n-1}^2}} \tag{II-31}$$

da cui moltiplicando e dividendo per VA_p^2 e ricordando che è in ogni caso:

$$\frac{VA_n}{I_n} = V_n$$

$$\frac{R_1}{R_n} = V_1^2 \frac{1}{V_n^2 - V_{n-1}^2} \tag{II-32}$$

Ora, l'espressione generale della resistenza di un generico avvolgimento è rappresentata da:

$$R_n = \varrho\, L_m\, N/V \frac{V_n - V_{n-1}}{S_n} \tag{II-33}$$

essendo ϱ la resistenza specifica, L_m la lunghezza della spira media e N/V il numero delle spire/volt con cui il trasformatore è avvolto. Secondo la (II-33) avremo pertanto:

$$\frac{R_1}{R_n} = \frac{S_n}{S_1} \frac{V_1}{V_n - V_{n-1}} \tag{II-34}$$

ed uguagliando la (II-32) alla (II-34):

$$\frac{S_n}{S_1} \frac{V_1}{V_n - V_{n-1}} = \frac{V_1^2}{V_n^2 - V_{n-1}^2} \tag{II-35}$$

da cui ovviamente:

$$\frac{S_n}{S_1} = \frac{V_1}{V_n + V_{n-1}} \tag{II-36}$$

semplice espressione che ci permette di calcolare con facilità la sezione

del filo di ogni tratto di avvolgimento in rapporto a quella della prima sezione del primario.

Volendo invece una relazione fra i diametri, basterà ricordare che le aree sono proporzionali ai quadrati dei diametri per ricavare:

$$\frac{\varnothing_n}{\varnothing_1} = \sqrt{\frac{V_1}{V_n + V_{n-1}}} \qquad \text{(II-37)}$$

Applichiamo ora, a titolo di esempio e per verifica, la formula trovata al calcolo del primario dello stesso trasformatore che, all'inizio del capitolo, abbiamo progettato per corrente specifica costante. Riuniamo, come precedentemente, i dati del calcolo in una tabella riassuntiva:

Tensione V	*Spire* N°	*Corrente* A	*∅ filo* mm	*Lunghezza avvolgim.* m	*Resist. sezione* Ω	*Resist. progress.* Ω	*Perdita nel rame* W
110	495	0,68	0,55	84	6,4	6,4	2,95
125	+ 67	0,60	0,38	11,4	1,81	8,21	2.95
140	+ 68	0,53	0,38	11,4	1,81	10,00	2,8
160	+ 90	0,47	0,33	15,3	3,25	13,25	2,9
220	+270	0,34	0,30	46	11,7	24,95	2,88
280	+270	0,27	0,25	46	16,9	41,85	3.05

Per il calcolo del ∅ del filo si è fatto uso della formula (II-37). Così ad esempio per la sezione tra 140 e 160 V essa ci ha fornito:

$$\frac{\varnothing_{160}}{\varnothing_{110}} = \sqrt{\frac{110}{160 + 140}} = 0{,}605$$

ed essendo $\varnothing_{110} = 0{,}55$,

$$\varnothing_{160} = 0{,}605 \times 0{,}55 = 0{,}332 \text{ mm}$$

Naturalmente per dare un carattere pratico al calcolo, i diametri sono stati arrotondati a valori correnti: ciò spiega perchè la perdita nel rame alle diverse prese, nell'ultima colonna, non sia perfettamente costante come dovrebbe essere. Va anche tenuto conto del fatto che in realtà la lunghezza di spira media non è costante per tutte le sezioni, ma cresce per le prese a tensione più alta se, come in generale si fa, queste sono avvolte sopra le altre: di ciò si può tener conto maggiorando leggermente per le prese superiori il diametro ottenuto dal calcolo.

Corrente specifica nei primari a perdite costanti.

Nel calcolo dei primari cosiddetti « a corrente specifica costante » si è visto come la corrente specifica base venga raggiunta solo nella sezione di avvolgimento che va dalla presa utilizzata a quella immediatamente inferiore: per tutte le altre sezioni al di sotto di questa la corrente specifica risulta inferiore, essendo questi avvolgimenti dimensionati per una

maggiore corrente: non si hanno quindi in nessun caso correnti specifiche superiori a quella base. Che cosa avviene invece a questo riguardo nei primari a dissipazione costante?

Consideriamo la corrente I_n relativa alla presa n e la corrente I_1 relativa alla prima presa: il loro rapporto è ovviamente:

$$\frac{I_n}{I_1} = \frac{V_1}{V_n}$$

Le relative correnti specifiche J_n e J_1 si ottengono dividendo la corrente per la sezione del filo corrispondente:

$$\frac{J_n}{J_1} = \frac{I_n}{I_1}\frac{S_1}{S_n} = \frac{V_1}{V_n}\frac{S_1}{S_n} \qquad \text{(II-38)}$$

Se al rapporto S_1/S_n sostituiamo il valore dato dalla (II-36) avremo:

$$\frac{J_n}{J_1} = \frac{V_1}{V_n}\,\frac{V_n + V_{n-1}}{V_1} =$$
$$= \frac{V_n + V_{n-1}}{V_n}$$

ossia:

$$\frac{J_n}{J_1} = 1 + \frac{V_{n-1}}{V_n} \qquad \text{(II-39)}$$

relazione la quale ci dice che, per una generica sezione n la corrente specifica di lavoro è maggiore di quella secondo la quale è stata calcolata la prima sezione di avvolgimento e cioè della corrente specifica base secondo cui il calcolo è stato impostato. E' facile verificare che i valori limite del secondo membro della (II-39) sono 2 e 1: e cioè 2 per il caso estremo in cui V_{n-1} sia estremamente prossima a V_n ($V_{n-1} = V_n$ è un non senso) e 1 per il caso in cui V_n sia infinitamente grande rispetto a V_{n-1}. Nei casi normali per le tensioni da noi in uso, il valore di J_n/J_1 oscilla tra 1,9 e 1,7 all'incirca. Questo significa che se si è assunta, per esempio, nel calcolo una corrente specifica base di 3 A/mm^2 vi sarà, in certe condizioni di lavoro, una parte di avvolgimento primario in cui la corrente specifica potrà raggiungere valori tra 5,1 e 5,7 A/mm^2.

Questi valori così elevati potrebbero indurre a pensare che avvolgimenti calcolati in tal modo possano essere pericolosi, ma è sufficiente considerare che:

1) Un simile stato anormale è limitato ad una piccola porzione di avvolgimento.

2) La dissipazione totale in W e quindi la quantità di calore che deve essere smaltita è sempre la stessa, nel complesso degli avvolgimenti.

3) Si tratta quindi, non di un sovrariscaldamento complessivo ma semplicemente locale con districuzione di calore per unità di volume non uniforme.

4) In breve la conducibilità termica dei conduttori tende ad equilibrare i vari punti dell'avvolgimento ad una eguale temperatura.

In generale quindi il sistema non porta inconvenienti, salvo nel caso che, essendosi tenuta come base una corrente specifica troppo elevata, il

riscaldamento della sezione sovraccaricata risulti tale da deteriorare gli isolanti immediatamente a contatto con il rame prima che la quantità di calore eccedente abbia potuto dissiparsi nel resto dell'avvolgimento. L'esperienza pratica di costruzioni in tal modo progettate conferma del resto quanto detto sopra: e decine di migliaia di trasformatori costruiti in base a questi criteri funzionano da anni senza inconveniente alcuno.

Guadagno di spazio nei trasformatori con primario a dissipazione costante.

Verifichiamo ora quale sia il risparmio di rame realizzato nell'avvolgimento del primario a perdita costante nei confronti di quelli calcolati a corrente specifica costante, prendendo ad esempio quello del trasformatore precedentemente trattato.

In questo stesso capitolo abbiamo già esaminato come si calcoli il coefficiente di ingombro del primario (rapporto tra l'ingombro del primario a prese multiple ed ingombro del primario a tensione unica) nel caso di calcolo a corrente specifica costante. Si è visto essere tale coefficiente espresso dalla relazione:

$$k_p = 1 + \Sigma_2^n \frac{V_n - V_{n-1}}{V_n}$$

che nel nostro particolare caso ci offre il seguente sviluppo numerico:

$$k_p = 1 + \frac{125 - 110}{125} + \frac{140 - 125}{140} + \frac{160 - 140}{160} + \frac{220 - 160}{220} + \frac{280 - 220}{280}$$

e quindi: $k'_p = 1{,}835$

Il primo termine di questa somma rappresenta l'ingombro della sezione 110 V, ingombro che sarà eguale anche nel caso di calcolo a perdita costante se adotteremo, come è ovvio, la stessa corrente specifica.

Risulteranno invece, nel primario a perdita costante, minori gli altri addendi ed il coefficiente di diminuzione risulterà naturalmente pari al rapporto fra le singole sezioni del rame calcolate nell'uno e nell'altro caso.

Questo rapporto si ricava come segue:

Calcolo a perdita costante:

$$\frac{S'_n}{S_1} = \frac{V_1}{V_n + V_{n-1}} \qquad \text{(II-40)}$$

Calcolo a corr. specif. costante:

$$\frac{S_n}{S_1} = \frac{V_1}{V_n} \qquad \text{(II-41)}$$

e dividendo membro a membro:

$$\frac{S'_n}{S_n} = \frac{V_n}{V_n + V_{n-1}} \qquad \text{(II-42)}$$

Nel caso di primario a perdita costante il coefficiente di ingombro sarà pertanto:

$$k'_p = 1 + \Sigma_2^n \frac{S'_n}{S_n} \frac{V_n - V_{n-1}}{V_n} =$$

$$= 1 + \Sigma_2^n \frac{V_n}{V_n + V_{n-1}} \frac{V_n - V_{n-1}}{V_n}$$

e infine:

$$k'_p = 1 + \Sigma_2^n \frac{V_n - V_{n-1}}{V_n + V_{n-1}} \qquad \text{(II-43)}$$

Applicando questa formula al nostro caso otteniamo:

$$k'_p = 1 + \frac{125 - 110}{125 + 110} + \frac{140 - 125}{140 + 125} + \frac{160 - 140}{160 + 140} + \frac{220 - 160}{220 + 160} + \frac{280 - 220}{280 + 220}$$

onde: $k_p = 1{,}47$

(con qualche arrotondamento).

Con questo sistema abbiamo quindi un primario di ingombro pari a 100 × 1,47 / 1,835 = ca. 80 % di quello precedentemente calcolato. Se si tiene conto di un coefficiente $\eta \cos \varphi'$ di 0,7 l'ingombro totale dell'avvolgimento sarebbe stato rispettivamente nei due casi:

Corr. specifica costante:

$$S_{cu} = \frac{1{,}835}{0{,}7} + 1 = 3{,}62$$

(essendo considerato 1 l'ingombro dovuto al secondario);

Perdita costante:

$$S'_{cu} = \frac{1{,}47}{0{,}7} + 1 = 3{,}1$$

Con un rapporto di ingombro (e di rame) pari a 100 × 3,1 / 3,62 = = 85,5 % ed un risparmio quindi del 15 % all'incirca nel rame. Questo corrisponde ad una diminuzione del peso complessivo e del costo del trasformatore di circa il 12 % tenuto conto che all'aumento dell'ingombro dell'avvolgimento corrisponde anche un aumento, seppure non direttamente proporzionale, del ferro costituente il circuito magnetico.

Come si vede, vale la pena di seguire questo sistema di calcolo che, pur dando ottimi risultati sia dal lato elettrico che da quello del buon funzionamento, permette di risparmiare non indifferentemente sul costo, sull'ingombro e sul peso del prodotto finito.

Per semplificare il compito del progettista i coefficienti di ingombro primario per il caso di primari a perdita costante sono stati calcolati ed elencati nella tabella N° II assieme a quelli relativi agli stessi primari per corrente specifica costante.

CAPITOLO NONO

LA CADUTA DI TENSIONE

Calcolo preventivo della caduta di tensione teorica.

Nel calcolo delle spire occorrenti per gli avvolgimenti secondari occorre sempre tener conto della caduta di tensione che si verifica per effetto delle correnti circolanti negli avvolgimenti (secondario e primario) e della resistenza che questi presentano alla circolazione di esse.

Considereremo per semplicità soltanto la caduta dovuta alla resistenza: le cadute reattive risultano infatti perfettamente trascurabili specie per carichi puramente ohmici come sono quelli su cui i trasformatori per radio si trovano generalmente a lavorare.

Si consideri una generica spira di lunghezza L_m e di sezione S percorsa da una corrente $I = SJ$, dove J è la corrente specifica cui essa è assoggettata.

La sua resistenza sarà:

$$R = \varrho \frac{L_m}{S} \qquad \text{(II-44)}$$

La caduta di tensione in detta spira per effetto della corrente I:

$$\triangle V = RI = \varrho \frac{L_m}{S} SJ = \varrho L_m J \qquad \text{(II-45)}$$

A sua volta la f.e.m. indotta nella spira secondo la nota relazione è espressa da:

$$V = 4{,}44 \, . \, B \, . \, s_{fe} \, . \, f \, . \, 10^{-8} \qquad \text{(II-46)}$$

Dalle (II-46) e (II-45) possiamo ricavare la caduta di tensione percentuale:

$$\triangle V \,\% = 100 \frac{\triangle V}{V}$$

che sarà:

$$\triangle V \,\% = 100 \, \varrho \, L_m \, J \, \frac{10^8}{4{,}44 \, . \, B \, . \, s_{fe} \, . \, f} \qquad \text{(II-47)}$$

espressione che ci fornisce la caduta di tensione percentuale in un avvolgimento di numero di spire qualsia-

si, essendo la relazione trovata per una spira valida anche se le spire sono n, essendo in questo caso n volte maggiori tanto $\triangle V$ quanto V.

Va notato che la (II-47) fornisce la caduta di tensione soltanto per quanto riguarda la corrente circolante nel secondario: dovremo però tener conto anche della caduta di tensione dovuta alla corrente nel primario, caduta che sarà percentualmente uguale se la J, come è ragionevole, sarà stata scelta uguale per i due avvolgimenti. In tal caso per ottenere la caduta di tensione totale effettiva non avremo praticamente che da raddoppiare il valore dato dalla (II-47):

$$\triangle V' \% = 2 \varrho L_m J \frac{10^{10}}{4{,}44 \cdot B \cdot s_{fe} \cdot f} \qquad \text{(II-48)}$$

Se vogliamo, almeno per i calcoli di prima approssimazione, una formula più breve e comoda all'uso, potremo determinare il valore di alcuni termini. Scegliendo come al solito:

$B = 10\,000$ linee/cm^2 $\quad f = 42$ Hz
$\varrho = 0{,}018\ \Omega/\text{m} \cdot \text{mm}^2 \quad J = 3$ A/mm^2

ed esprimendo L_m in cm, la (II-48) si semplifica nella seguente maniera:

$$\triangle V' \% = 5{,}8 \frac{L_m}{s_{fe}} \qquad \text{(II-49)}$$

Volendo tener conto anzichè della sezione netta del ferro s_{fe}, della sezione lorda s'_{fe} che è un dato più semplice da calcolare, terremo conto di un coefficiente medio di stipamento del pacco lamiere di 0,9 e scriveremo pertanto:

$$\triangle V' \% = \frac{5{,}8}{0{,}9} \frac{L_m}{s'_{fe}} \simeq 6{,}5 \frac{L_m}{s'_{fe}} \qquad \text{(II-50)}$$

in cui, ricordiamo, L_m ed s'_{fe} sono espresse rispettivamente in cm e cm^2.

Esempio numerico. Sia da calcolare la caduta di tensione in un trasformatore avente un pacco di cm $2{,}5 \times 4$ e una spira media di 18 cm il cui calcolo si voglia condurre con $B = 10\,000$ $J = 3$ A/mm^2 $f = 42$. Adottiamo senz'altro la formula (II-50) e ricaviamo:

$$\triangle V' \% = 6{,}5 \times \frac{18}{2{,}5 \times 4} = 11{,}7\ \%$$

Se i dati del calcolo non sono invece quelli per cui vale la (II-50), ci varremo della formula generale (II-48). Così dovendo calcolare la caduta di tensione in un piccolissimo trasformatore di pacco $1{,}7 \times 2$ cm, con $B = 12\,000$ $\quad J = 3{,}5$ A/mm^2 $f = 50$ otterremo, con spira media di 10 cm:

$$\triangle V' \% \doteq 2 \times 0{,}018 \times 0{,}10 \times 3{,}5 \times$$
$$\times \frac{10^{10}}{4{,}44 \times 12000 \times 0{,}9 \times 3{,}4 \times 50} = 15{,}4\%$$

Altra formula approssimata per la caduta di tensione.

Vale la pena di esaminare la forma che assume la (II-50) quando il nucleo magnetico abbia, come sarebbe consigliabile agli effetti della caduta di tensione, forma quadrata ed il lamierino sia del tipo ad E, con listello ricavato dalla tranciatura della finestra (ved. fig. 19).

In questo caso la lunghezza della spira media risulta

$$L_m = 4\,\text{L} + \frac{\pi\,\text{L}}{2} \cong 5{,}5\ \text{L}$$

e la sezione del nucleo è

$$s'_{fe} = \text{L}^2 \qquad \text{(II-51)}$$

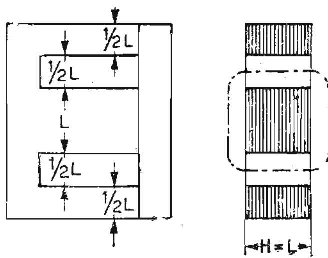


Fig. 19 - Pacco lamellare a nucleo quadro di lamierini ad E con listello.

Sostituendo questi valori nella (II-50) otteniamo:

$$\Delta V' \% = 6{,}5 \frac{5{,}5\,L}{L^2} \cong \frac{36}{L} \quad \text{(II-52)}$$

Questa formula, si badi bene, vale solo per nuclei a sezione quadrata e per i valori di B, J, f sopraindicati; essa ci porge però l'occasione di fare in proposito qualche interessante osservazione:

1) Come la formula (II-52) chiaramente dimostra, la caduta di tensione, ferme restando le altre condizioni, è tanto più rilevante quanto più piccolo è il nucleo su cui il trasformatore è avvolto.

2) Conseguentemente, ove sia richiesta una caduta di tensione esigua occorrerà prendere i seguenti provvedimenti (ved. formula generale (II-48):

A) Usare nuclei a sezione quadrata

B) Aumentare il valore dell'induzione al massimo consentibile

C) Fissare una sezione del nucleo sovrabbondante

D) Diminuire la corrente specifica (tanto nel secondario come nel primario) al minimo possibile.

Variazione di tensione da vuoto a carico.

Sempre in tema di caduta di tensione occorre osservare che la caduta di tensione calcolata con le formule ora determinate ha unicamente un valore teorico per il calcolo delle spire da avvolgere in più sui secondari per compensarla; non è pertanto da confondersi con la variazione di tensione tra vuoto e carico la quale ha sempre un valore minore.

Essendo infatti la caduta di tensione provocata dalla circolazione delle correnti primaria e secondaria nei rispettivi avvolgimenti, quando il trasformatore funziona a vuoto non vi è alcuna corrente circolante negli avvolgimenti secondari ma nel primario circola pur sempre la corrente di magnetizzazione, che per i valori di B molto elevati, può assumere valori fino al $60 \div 70$ % della corrente primaria a pieno carico.

Si ha pertanto anche a vuoto una piccola caduta di tensione corrispondente a questa corrente (essa costituisce generalmente circa il 20 % della caduta teorica). La effettiva caduta di tensione tra vuoto e pieno carico risulta pertanto pari soltanto all'80 % circa di quella teorica di calcolo. Questo effetto riesce talora comodo quando si richieda una buona regolazione nella tensione (in caso di carico variabile); può naturalmente essere esaltato al massimo scegliendo un valore di B cui corrisponda una rilevante corrente magnetizzante, confermando così quanto già detto precedentemente.

Naturalmente in qualche altra occasione può esser utile l'effetto contrario; nel qual caso non c'è che prendere i provvedimenti diametralmente opposti a quelli già consigliati.

Applicazione dei valori della caduta di tensione al calcolo del numero di spire.

Determinata con una delle formule, (II-48), (II-50), (II-52) la caduta di tensione teorica vediamo come applicarla al calcolo del numero delle spire per ogni avvolgimento.

Per compensare questa caduta noi dovremo calcolare gli avvolgimenti secondari in modo che la f.e.m. che in essi si indurrà sia tale che, diminuita della caduta, ci fornisca esattamente la tensione richiesta. Dovrà essere quindi:

$$100\ V = E\ (100 - \Delta V\ \%)$$

e cioè:

$$E = V \frac{100}{100 - \Delta V\ \%} \qquad \text{(II-53)}$$

Si applichi ad esempio la formula al calcolo di un avvolgimento che debba fornire a carico la tensione di 275 V. La caduta di tensione, precedentemente calcolata, sia stata trovata del 13,4 %. L'applicazione della (II-53) ci permette di trovare:

$$E = 275 \frac{100}{100 - 13,4} = 318\ \text{V}$$

Sarà pertanto 318 il numero per cui dovremo moltiplicare la cifra di spire/volt calcolata perchè, sotto carico, quell'avvolgimento fornisca i 275 V richiesti.

RISCALDAMENTO E RENDIMENTO

Riscaldamento dei trasformatori.

Le dimensioni di un trasformatore sono determinate essenzialmente dalla possibilità dello stesso di smaltire la quantità di calore generata per effetto delle perdite senza assumere una temperatura pericolosa per gli isolanti ed in genere per le parti che non possono sopportare temperature troppo elevate. La quantità di calore generata in un certo tempo è facilmente calcolabile in base all'equivalente termico della energia elettrica (calorie per ogni watt.ora). Le perdite che determinano questo calore sono pure facilmente calcolabili, come vedremo tra poco; ciò che invece non è prevedibile che con larga approssimazione è la temperatura alla quale dovrà portarsi il trasformatore perchè si abbia equilibrio tra la quantità di calore generata e quella dissipata nell'aria circostante. Il problema si presenta infatti complesso perchè, in genere, non sono note con precisione la temperatura dell'ambiente e le condizioni di ventilazione essendo questi termini strettamente dipendenti dal particolare collocamento del trasformatore nell'apparecchiatura di cui esso fa parte. Si ricordi che spesso, vicino al trasformatore radio si trovano valvole a forte dissipazione, che talvolta esso è sistemato sotto il telaio senza apprezzabile sfogo d'aria, ecc.

In linea generale si può dire quindi soltanto quanto ci insegna in materia la fisica e cioè che il raffreddamento sarà tanto più energico quanto più veloce sarà il ricambio dell'aria intorno al trasformatore e quanto più sviluppata sarà la superficie di questo in rapporto alla quantità di calore da dissipare.

Come vedremo appresso, la quantità di calore dovuta alle perdite è una funzione, oltre che del rendimento, del peso del ferro e del rame, ovverossia del volume totale del trasformatore: buone condizioni di raffreddamento si otterranno pertanto rendendo massima la superficie di esso

in rapporto al suo volume: sotto questo aspetto trasformatori di forma allungata riescono più favorevoli di quelli a forma pressapoco cubica: in questi ultimi tipi però le perdite risultano generalmente minori che nei precedenti per cui non si ha in pratica differenza tra un tipo e l'altro a questo riguardo: d'altronde molto più importante è creare una buona ventilazione e questo è il lato del problema che difficilmente può essere previsto dal costruttore del trasformatore a meno che esso non sia anche il costruttore dell'apparecchiatura completa cui il trasformatore è destinato.

Per il controllo generico delle condizioni di raffreddamento di un trasformatore conviene esaminare il rapporto tra la superficie esterna di esso, in cm² ed il numero dei watt che esso deve dissipare. Questo rapporto deve essere di $30 \div 25$ cm²/W per ottime costruzioni, di $25 \div 20$ per costruzioni di minore qualità mentre valori di $20 \div 15$ si riferiscono a trasformatori quasi al limite della buona conservazione nel tempo.

Vediamo ora come si calcoli la potenza perduta in un trasformatore. Sappiamo che queste perdite dipendono in parte dal ferro e in parte dal rame: dal ferro per isteresi magnetica e correnti parassite, dal rame per effetto Joule.

Calcolo delle perdite nel ferro.

Esaminiamo prima le perdite nel ferro: esse sono indicate dal fornitore della materia prima o del lamierino tranciato, in W/kg. Questa cifra si riferisce sempre ad induzione di 10 000 linee/cm² e frequenza 50 Hz; la tabella di fig. 20 fornisce i coefficienti per cui la perdita unitaria va moltiplicata quando l'induzione e la frequenza siano diverse da quelle sopraindicate.

A questo proposito occorre notare che un calcolo teorico in base alle cifre di perdita indicate dal costruttore non può essere mai esatto: le cause di divergenza tra la teoria e la pratica risiedono principalmente in queste ragioni:

1) Bene spesso, per ragioni economiche, i lamierini per piccoli trasformatori vengono ricavati dai ritagli di lamiera già utilizzata per grandi costruzioni; si possono pertanto riscontrare in una sola partita qualità diverse di lamierini cui competono cifre di perdita diverse.

2) Le bave di tranciatura e l'isolamento difettoso delle lamelle, la

presenza di calotte magnetiche e di tiranti attraversanti il pacco, ecc. portano sempre ad un aumento, variabile da caso a caso, delle perdite per correnti parassite.

In ultima analisi le perdite reali risultano sempre maggiori di quelle teoricamente calcolabili: ma il rapporto di maggiorazione non è facilmente determinabile dipendendo da cause variabilissime secondo i casi.

In calcoli di progetto conviene prudenzialmente aumentare i valori teorici del 30 % sebbene in alcuni casi questa cifra possa essere in realtà anche maggiore.

Ad ogni modo, sia pure con una certa approssimazione le perdite nel ferro sono calcolabili in sede di progetto conoscendo le caratteristiche teoriche del lamierino usato ed il peso del pacco dei lamierini previsto.

B \ f	42	45	50	60
7.000	0.39	0.42	0.49	0.61
8.000	0.52	0.55	0.64	0.80
9.000	0.66	0.70	0.81	1.01
10.000	0.81	0.86	1	1.25
11.000	0.98	1.04	1.21	1.51
12.000	1.17	1,24	1.44	1.80
13.000	1.37	1.45	1.69	2.12

Fig. 20 - Tabella di moltiplicazione delle perdite nel ferro per diverse induzioni e frequenze.

Calcolo delle perdite nel rame.

Vediamo come ora si conteggino le perdite dovute al rame.

Il calcolo esatto di queste dovrebbe essere eseguito calcolando una per una le resistenze dei vari avvolgimenti e moltiplicandole per il quadrato della corrente ad esse relativa: ma questo sistema è lungo e complicato; conviene affidarsi ad un calcolo più semplice seppure, in genere, leggermente approssimato. Si tratta di determinare una cifra di perdita in watt/kg di rame in modo da poter conteggiare queste nello stesso modo con cui si calcolano quelle del ferro. Ecco come si può giungere a questi risultati.

Si consideri una generica spira di sezione S attraversata da una corrente $I = SJ$ se J è la corrente specifica di calcolo; essendo L la lunghezza

della spira la sua resistenza sarà:

$$R = \varrho \frac{L}{S} \qquad \text{(II-54)}$$

La perdita Joule sarà pertanto:

$$W_{cu} = RI^2 = \varrho \frac{L}{S} \; I^2 =$$

$$= \varrho \frac{L}{S} J^2 S^2 = \varrho L S J^2 \qquad \text{(II-55)}$$

ma il termine LS non è altro che il volume della spira per cui potremo scrivere:

$$W_{cu} = vl_{cu} J^2 \qquad \text{(II-56)}$$

Se la corrente specifica J è costante per tutti gli avvolgimenti, come è logico che sia, la perdita totale sarà espressa da:

$$W_{cu} = \varrho J^2 \Sigma \; vl_{cu} = \varrho J^2 Vl_{cu} \qquad \text{(II-57)}$$

essendo Vl_{cu} il volume totale di tutti gli avvolgimenti, primari e secondari assieme. Se nella (II-57) esprimiamo ϱ in $\Omega/\text{m} \cdot \text{mm}^2$, J in A/mm^2 e Vl_{cu} in cm^3, W_{cu} risulta in W.

Il valore di ϱ per il rame verrà considerato mediamente pari a 0,02, dovendosi tener conto del riscaldamento del filo che ne aumenta la resistività. Con ciò la (II-57) diviene:

$$W_{cu} = 0{,}02 \; Vl_{cu} \, J^2 \qquad \text{(II-58)}$$

Per arrivare ad una espressione di perdita per unità di peso notiamo che se P_{cu} è il peso in kg del rame:

$$P_{cu} = 8{,}9 \; Vl_{cu} \, 10^{-3} \qquad \text{(II-59)}$$

da cui:

$$Vl_{cu} = 112 \; P_{cu} \qquad \text{(II-60)}$$

Dalla (II-60) e dalla (II-58) otteniamo:

$$\frac{W_{cu}}{P_{cu}} = 2{,}24 \; J^2 \qquad \text{(II-61)}$$

Questa è la formula ricercata in base alla quale si è calcolata la tabella seguente in cui per diversi valori di J si ottengono le diverse perdite per kg di rame di avvolgimento.

J =	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25
W_{cu}/kg	5	6,9	9	11,3	14	17	20	23,7	27,5	31,5	36	40,5

Valutazione pratica delle perdite in sede di progetto.

Per il conteggio delle perdite nel ferro occorre, come si è detto, conoscere o calcolare il peso del pacco lamellare previsto; conoscere se si ha o se si è avuta la possibilità di pesarlo effettivamente; calcolare in base a semplici computi geometrici se non si ha a disposizione questo dato.

Dato, in un modo o nell'altro, il peso del ferro, è sufficiente moltiplicarlo per la perdita unitaria prevista, (maggiorata come si è detto pre-

cedentemente) per ottenere le perdite totali dovute al ferro.

Nel capitolo 7° abbiamo già visto come si possa calcolare il peso complessivo del rame di un avvolgimento; questo dato moltiplicato per la perdita unitaria del rame indicata dalla tabella ci fornisce immediatamente la cifra delle perdite del rame. A questo proposito occorre però fare la seguente osservazione:

Se il trasformatore ha un primario a prese multiple (calcolato con un sistema a corrente specifica costante o a perdita costante non importa) il peso di rame da conteggiare per il calcolo delle perdite sarà soltanto quello della parte di avvolgimento corrispondente alla prima presa e non tutto quello del primario completo. Difatti è naturale che la corrente specifica J delle formule relative va applicata solamente a questa parte, poichè nel funzionamento su altre prese essa è minore. L'unica differenza fra i due sistemi di calcolo sta nel fatto che nel primario a perdita costante la perdita così calcolata ha valore qualunque sia la presa primaria utilizzata mentre in quello a corrente specifica costante la perdita nel rame diminuisce con l'aumentare della tensione primaria di funzionamento. D'altronde ciò non ha alcuna importanza dato che un calcolo di perdita ed un'eventuale verifica di riscaldamento vanno ovviamente condotti per le condizioni di funzionamento più gravoso. Vedremo appresso, nel calcolo completo di un trasformatore, un esempio pratico di applicazione delle formule.

Calcolo del rendimento.

Calcolate separatamente le perdite del ferro e del rame, la loro somma rappresenterà le perdite complessive del trasformatore nelle condizioni normali di funzionamento. Essendo il rendimento della trasformazione definito come il rapporto tra la potenza reale erogata al secondario e quella, pure reale, assorbita al primario, la formula del rendimento risulta la seguente:

$$\eta\,\% = 100\,\frac{W_s}{W_s + W_d} = 100\,\frac{VA_s \cos\varphi}{VA_s \cos\varphi + W_d} \qquad \text{(II-62)}$$

essendo VA_s la potenza apparente secondaria totale, W_d le perdite totali somma di quelle nel ferro e di quelle nel rame, e $\cos\varphi$ il fattore di potenza del carico (da non confondersi con quello proprio del trasformatore che fu indicato con $\cos\varphi'$).

Parte III

PROGETTO

PROGETTAZIONE PRATICA

Progetto completo di un trasformatore di alimentazione.

Le nozioni apprese e le formule stabilite nei capitoli precedenti ci mettono ora in grado di eseguire il calcolo completo di un trasformatore, determinando con esattezza sia i dati elettrici e meccanici di costruzione sia i costi relativi. Prima di presentare un esempio numerico concreto, ricapitoliamo qui appresso tutti i successivi passi che ci porteranno al risultato finale.

1) Determinazione della potenza secondaria apparente totale.
2) Determinazione della potenza primaria.
3) Calcolo del coefficiente d'ingombro del primario.
4) Calcolo della potenza geometrica.
5) Scelta del lamierino e del pacco da usare in relazione alla potenza geometrica, alla frequenza di lavoro, all'induzione e corrente specifica previste oltre al probabile coefficiente di riempimento finestra.
6) Calcolo del numero di spire/volt
7) Determinazione della caduta di tensione.
8) Conteggio delle spire relative alle varie sezioni del primario e del secondario.
9) Calcolo delle correnti primarie relative alle varie prese.
10) Determinazione del diametro del filo di tutti gli avvolgimenti.
11) Verifica dell'ingombro dell'avvolgimento.
12) Calcolo del peso del rame.
13) Calcolo delle perdite nel rame.
14) Calcolo della perdita nel ferro.
15) Calcolo del rendimento.

Il procedimento sovraesposto potrà sembrare lungo e laborioso, ma in

realtà esso è molto spedito, in specie se fatto basandosi su tabelle già predisposte e formule semplificate; vedremo inoltre appresso come si possano apprestare moduli normalizzati che ottimamente servono di guida al calcolo e permettono di raccogliere tutti i dati importanti secondo una distribuzione logica ed invariabile.

Ed ora un esempio numerico di progetto di trasformatore, in cui troveranno applicazione formule e tabelle, riuscirà di notevole giovamento per la comprensione di quanto non fosse stato sufficientemente chiaro.

Sceglieremo per il progetto un trasformatore di potenza relativamente rilevante, adatto ad esempio per un amplificatore di potenza.

I dati richiesti siano i seguenti:

Tensioni primarie: 15 - 0 - 15 - 125 - 165 - 235 - 280

(Corrispondenti alle possibili tensioni: 110 - 125 - 140 - 150 - 165 - 180 - 220 - 235 - 250 - 265 - 280 - 295)

Frequenza di lavoro: compresa fra 42 e 50 Hz

Tensioni e correnti secondarie:

400 + 400 V — 0,150 A (c.c.)
6,3 V — 3 A
5 V — 3 A
5 V — 2 A

Seguiamo il procedimento prima esposto indicando con gli stessi numeri i relativi capoversi:

1) *Potenza secondaria totale*:

$$VA_s = 400 \times 0{,}15 + 6{,}3 \times 3 + 5 \times 3 + 5 \times 2 = 60 + 19 + 15 + 10 = 104 \text{ VA}$$

2) *Potenza primaria*: per determinarla dovremmo presupporre un certo rendimento ed un certo cos φ′: il primo lo ricaviamo dal diagramma N° III (esso si riferisce a dati medi ma non è necessario che questo coefficiente sia molto preciso): il secondo dipende in larga misura dall'induzione e dal tipo di lamierino che sceglieremo appresso; pensando di realizzare una buona costruzione lo supporremo pari a 0,90. Ciò stante la potenza primaria sarà:

$$VA_p = VA_s / \eta \cos\varphi' = 104 / 0{,}8 \times 0{,}9 = 144 \text{ VA}.$$

3) *Coefficiente d'ingombro del primario*: qui bisogna stabilire subito se si farà un primario a corrente specifica costante o a perdita costante; dati i vantaggi che presenta, sceglieremo la seconda soluzione e ricaveremo addirittura il dato cercato dalla tabella N° II in corrispondenza al tipo di primario considerato. Vi troviamo il valore di 1,52.

4) *Potenza geometrica*:

$$VA' = VA_s \left(1 + \frac{k_n}{\eta \cos\varphi'}\right) = 104 \left(1 + \frac{1.52}{0{,}8 \times 0{,}9}\right) = 315 \text{ VA}$$

5) *Scelta del lamierino e del pacco.* E' questo il punto più scabroso del progetto: se il progettista non ha già pronte, essendosele fabbricate preventivamente, tabelle del genere di quella di fig. 15 b per i diversi lamierini a sua disposizione, egli dovrà procedere per tentativi, scegliendo secondo la sua pratica il lamierino che più gli sembra adatto, fissando un certo spessore del pacco di prima approssimazione e verificando se la potenza geometrica ora determinata è compatibile con i dati previsti: ritoc-

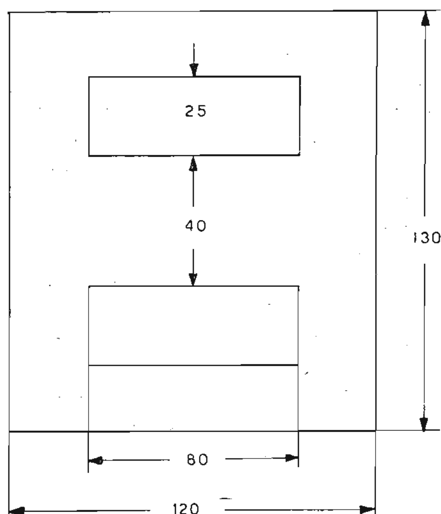


Fig. 21 - Dimensioni del lamierino impiegato nell'esempio del testo.

cherà quindi questi dati in base ai risultati.

Vediamo come si procede nel caso specifico del trasformatore che stiamo calcolando.

Supponiamo di poter usare il la**mierino** le cui dimensioni sono date dalla fig. 21 e in un primo tempo si adotti pure la formula semplificata (II-22) relativa ad $f = 42$; $B = 10000$; $J = 3$ A/mm^2 e $k_f = 0{,}3$. Sarà sufficiente per il nostro caso un nucleo quadrato (40 $\times$ 40 mm)?

Verifichiamo con la formula sopracitata. Essa ci fornisce:

$$VA' = 1{,}5\ (4 \times 4).(2{,}5 \times 8) = 480\ \text{VA}$$

Il nostro pacco di lamiere prescelto può sembrare abbondante: dobbiamo però considerare che la potenza geometrica calcolata al Cap. 4° non tiene conto del fatto che il secondario A.T., per le note ragioni svolte nel Cap. 5°, deve essere dimensionato con estrema abbondanza, tanto da richiedere uno spazio anche tre volte più grande di quanto comporti la sua potenza. Lasciamo pertanto le cose come stanno, salvo a verificare più tardi gli ingombri.

6) *Calcolo delle spire/volt.* Per avere questo dato dobbiamo adesso fissare l'induzione alla quale vogliamo far lavorare il ferro; dato che non dobbiamo fare alcuna acrobazia per guadagnare spazio di avvolgimento potremo tenere senz'altro il valore di 10 000 linee per cm^2 secondo il quale abbiamo verificato la potenza geometrica. Senza bisogno di effettuare aritmeticamente il calcolo secondo la formula generale ricaviamo il numero di spire/volt dal nomogramma N° IV relativamente ad una sezione lorda del nucleo di 16 cm^2 (4 $\times$ 4), induzione 10 000 e frequenza 42 Hz. Dal suddetto otteniamo la cifra di 3,75 spire/volt.

7°) *Caduta di tensione.* Abbiamo già scelto il valore dell'induzione; per determinare la caduta di tensione dobbiamo ora fissare il valore della corrente specifica che adotteremo per il calcolo delle sezioni del filo. Seguendo il ragionamento fatto precedentemente non abbiamo nulla in contrario a scegliere il valore di 3 A/mm^2 che ci permetterà di fare uso della formula semplificata (II-50). Per usarla dovremo però calcolare la lunghezza della spira media che otterremo dalla (II-20). La lunghezza della spira media (in cm) risulta:

$$L_m = 2\ (4 + 4) + 2{,}5 \times \pi =$$
$$= 16 + 7{,}8 = 23{,}8\ \text{cm}.$$

Ed ora non ci resta che conteggiare la caduta di tensione:

$$\Delta V' \% = 6{,}5 \frac{23{,}8}{16} = \text{ca. } 9{,}6\ \%$$

8) *Conteggio spire.* Conoscendo spire/volt e caduta di tensione ci è ora possibile conteggiare le spire di ogni avvolgimento. Per il primario non avremo che da moltiplicare le varie tensioni per il numero di spire/volt; per i secondari dovremo tener conto della caduta di tensione: in tal caso anzichè maggiorare le cifre delle tensioni può riuscire più agevole aumentare nella stessa misura la cifra di spire/volt. Per i secondari avremo dunque:

$$N/V = 3{,}75 \frac{100}{100 - 9{,}6} = 4{,}15$$

A conti fatti le spire risultano come dal seguente prospetto:

primario:

15+15+110+ 40+ 70+ 45 volt
56+56+412+150+263+169 spire

secondari:

400+400	6,3	5	volt
1660+1660	26	20,75	spire

Le spire dei secondari 5 volt risultano frazionarie: non potendosi praticamente avvolgere ¾ di spira converrà aumentarne il valore a 21 spire esatte, eventualmente riducendo la sezione di questi avvolgimenti per aumentarne la caduta di tensione.

9) *Correnti nel primario.* Essendosi già calcolata la potenza apparente primaria, le ricaviamo molto agevolmente dividendo questa per le successive tensioni *minime* di lavoro di ogni avvolgimento. Abbiamo detto minime perchè il nostro primario comporta degli spostamenti di tensione anche all'inizio dell'avvolgimento e quindi alle prese principali (125 - 165 - 235 - 280) potranno essere applicate tensioni diverse a seconda della presa di aggiustamento utilizzata. Così per la presa 125 la tensione minima di lavoro sarà di 125 — 15 = 110 volt, per la presa 165, 150 volt, ecc.

La parte di avvolgimento corrispondente alle prese di aggiustamento ± 15 volt sarà naturalmente calcolata per la massima corrente possibile. Le massime correnti primarie saranno quindi:

Zona	*Calcolo*	*Corrente*
+15 volt	144/140	1,03 A
—15 volt	144/125	1,15 A
125 volt	144/110	1,31 A
165 volt	144/150	0,96 A
235 volt	144/220	0,65 A
280 volt	144/265	0,54 A

10) *Determinazione diametro dei fili.* Essendosi fissata una corrente specifica di 3 A/mm² la sezione del filo relativa alla corrente 1,31 A risulterà di 1,31/3 = 0,435 mm² pari ad un diametro di circa 0,75 mm. Per le prese successive avendo stabilito di calcolare il primario a perdita costante faremo uso della formula (II-36) ottenendo nei vari casi:

$$\frac{S_{150}}{S_{110}} = \frac{110}{150 + 110} = 0{,}423$$

$$\frac{S_{220}}{S_{110}} = \frac{110}{220 + 150} = 0{,}297$$

$$\frac{S_{265}}{S_{110}} = \frac{110}{265 + 220} = 0{,}227$$

quindi:

$$S_{150} = 0{,}423 \times 0{,}435 = 0{,}184$$

$$S_{220} = 0{,}297 \times 0{,}435 = 0{,}129$$

$$S_{265} = 0{,}227 \times 0{,}435 = 0{,}099$$

Le sezioni trovate corrispondono grosso modo rispettivamente ai diametri di 0,50; 0,40; 0,35 mm: non volendo usare più di tre diametri diversi per il filo del primario potremo avvolgere le ultime due sezioni 150-220 e 220-265 con filo di diametro di mm 0,40 oppure di 0,38, qualora si disponesse di questa misura. Naturalmente, con quest'ultima soluzione il primario risulterà leggermente sovraccaricato nell'utilizzazione sulla presa 220, ma la variazione è di così lieve entità che non dobbiamo temere inconvenienti. Ad ogni modo noi supporremo di non disporre della misura 0,38 piuttosto eccezionale ed avvolgeremo pertanto il primario con i dati seguenti:

Sezione Volt	N°. di spire		∅ filo mm.
	parz.	progr.	
+15 ÷ 0	56	56	0.75
0 ÷ —15	56	112	0.75
—15 ÷ 125	412	524	0.75
125 ÷ 165	150	674	0.50
165 ÷ 235	263	937	0.40
235 ÷ 280	169	1106	0.40

Il conto delle sezioni di filo per i secondari si fa analogamente: terremo presente le considerazioni svolte nel Cap. 5° a proposito del valore della corrente di picco nell'avvolgimento A.T. e terremo pertanto un valore abbondante per la sezione, esattamente il doppio di quanto sarebbe necessario. Ciò posto, ecco come si svolgono i conti:

Sec. AT $S_{AT} = 2\,(0{,}15 \times 0{,}708/3) =$
$\varnothing = 0{,}30$ mm $= 0{,}0708$ mm^2

Sec. 6,3 *V* - 3 *A* $S_{6,3} = 3/3 =$
$\varnothing = 1{,}20$ mm $= 1$ mm^2

Sec. 5 *V* - 3 *A* $S_{5'} = 3/3 =$
$\varnothing = 1{,}20$ mm $= 1$ mm^2

Sec. 5 *V* - 2 *A* $S_{5''} = 2/3 =$
$\varnothing = 0{,}90$ mm $= 0{,}66$ mm^2

E con ciò il calcolo vero e proprio del trasformatore è finito: gli ulteriori conteggi si riferiscono soltanto a verifiche del risultato, che possono essere omesse ma che è sempre bene fare, specie se si tratta non di costruire immediatamente il trasformatore ma di fare un preventivo di costo basato unicamente sui risultati del calcolo. Procediamo quindi fino in fondo.

11) *Verifica d'ingombro.* Si tratta di calcolare la sezione netta complessiva del rame e di paragonarla all'area della finestra disponibile per avere un'idea della possibilità o meno di poter disporre l'avvolgimento in questo spazio.

La sezione rame complessiva la calcoliamo moltiplicando la sezione del filo di ogni avvolgimento per il numero delle spire che lo compongono: effettuato ciò per tutti gli av-

volgimenti, la somma dei diversi termini rappresenta il risultato cercato.

Il calcolo è riportato nella seguente tabella:

Avvolgimento	*spire* n°	Ø *filo* mm	*Sez. filo* mm^2	*Sez. totale avvolgim.* mm^2
Primario	524	0,75	0,44	231
»	150	0,50	0,195	30
»	432	0,40	0,125	54
Secondario AT	3320	0,30	0,0708	232
Sec. 6,3 volt	26	1,2	1,12	29
Sec. 5 V - 3 A	21	1,2	1,12	23,5
Sec. 5 V - 2 A	21	0,9	0,64	13,5
			Sezione complessiva rame	613,0

La sezione della finestra del lamierino usato è di $25 \times 80 = 2000$ mm². Il coefficiente di riempimento finestra k_f è quindi di $613/2000 = 0,306$, valore assai ragionevole per cui potremo essere senz'altro sicuri che l'avvolgimento sarà contenuto nella finestra, come del resto avevamo già previsto quando calcolammo la potenza virtuale del pacco, e con un coefficiente di riempimento molto vicino a quello presupposto.

12) *Calcolo del peso del rame.* Conoscendo adesso la sezione complessiva del rame e la lunghezza della spira media, già precedentemente calcolata, possiamo calcolare il volume del rame e successivamente il suo peso.

Moltiplicando i due dati sopraddetti otteniamo il volume del rame:

$$Vl_{cu} = S_{cu} \times L_m =$$
$$= 6{,}13 \times 23{,}8 = 146 \text{ cm}^3$$

che per un peso specifico del rame di 8,9 gr/cm³ ci dà:

$$P_{cu} = 8{,}9 \; Vl_{cu} = 8{,}9 \times 146 = 1300 \text{ gr.}$$

13) *Perdite nel rame.* Le calcoleremo con la formula (II-58) in cui però dovremo porre al posto di Vl_{cu} non il volume complessivo del rame precedentemente calcolato ma un valore minore, dato che per il primario considereremo solo l'avvolgimento fino alla prima presa, secondo quanto detto al Capitolo 10° e per il secondario A.T. solo il volume corrispondente alla potenza erogata con $J = 3$ A/mm². Rifacendo la somma con queste riserve e notando che anche la parte corrispondente a + 15 V non è, per analoghe ragioni, da calcolare, otteniamo un valore $Vl'_{cu} = 85$ cm³; con la formula citata si ha:

$$W_{cu} = 0{,}02 \; Vl'_{cu} \cdot J^2 =$$
$$= 0{,}02 \times 85 \times 9 = 15{,}3 \; W$$

Allo stesso risultato saremmo giunti calcolando prima il peso e quindi la perdita secondo la tabella del Cap. 10°. Si sarebbe avuto infatti un peso di 0,765 kg.; dalla tabella si sarebbe ricavata una perdita unitaria di 20 W/kg donde ancora:

$$W_{cu} = 0{,}765 \times 20 = 15{,}3 \; W$$

14) *Perdita nel ferro.* Il costruttore del lamierino da noi usato ci garantisce una perdita di 2,3 W/kg. Come già detto a suo tempo, noi maggioreremo questa cifra del 30 % per criterio prudenziale e ci baseremo pertanto sul valore di 3 W/kg. Il peso del pacco di lamierini è di kg 3,250 (supporremo di averlo pesato o calcolato geometricamente).

Pertanto la perdita nel ferro sarà di $3 \times 3,25 = 9,75$ W.

15) *Rendimento.* A completare le nostre verifiche calcoleremo il rendimento del trasformatore secondo la formula (II-62). Per semplicità e con buona approssimazione riterremo $\cos \varphi = 1$. Le perdite totali (rame e ferro) sono di: $15,3 + 9,75 = 25,05$ W.

Per cui avremo:

$$\eta \,\% = 100 \frac{104}{104 + 25,05} = 80,5 \,\%$$

valore estremamente vicino a quello supposto in principio per il calcolo della potenza primaria. Potremo quindi essere sicuri che i nostri conti sono stati fatti su giuste basi.

C A P I T O L O   D O D I C E S I M O

CONSIGLI PRATICI AI PROGETTISTI

Note sul calcolo pratico dei trasformatori.

Al lettore che avrà avuto la pazienza di seguire l'esempio numerico precedente sarà sembrato forse lungo e complicato il procedimento di calcolo. Faccio però notare che, come sempre succede in questi casi, è più lungo il dire che il fare e basta eseguire una diecina di calcoli del genere per impadronirsi tanto del sistema da poter effettuare tutti i conti in meno di cinque minuti.

A questo risultato si arriva facilmente soprattutto quando si faccia uso di dati tabellari già predisposti e soprattutto si usino formule semplificate che ciascuno potrà costruirsi con i dati di calcolo da lui più comunemente usati. Non è inoltre tassativo che si debbano adoperare per il calcolo formule con dati esattamente eguali a quelli che si vorranno impiegare: buona parte dei conteggi si potranno eseguire con formule base che ci daranno risultati che potremo modificare facilmente con proporzioni lineari molto semplici.

Faccio un esempio: le formule semplificate di cui abbiamo fatto uso finora valgono per induzione 10 000, corrente specifica 3 A/mm², frequenza 42, coefficiente di stipamento lamierini 0,9 e coefficiente di riempimento finestra 0,3.

Esaminiamo le due principali formule che abbiamo determinato nel corso della trattazione:

A) *formula della potenza virtuale*:

$$VA' = 1{,}5\, s_{fe}\, S_f \qquad \text{(II-22)}$$

Nella formula generale da cui essa deriva B, J, k_f ed f compaiono al numeratore: pertanto la potenza virtuale di un certo pacco di lamierini per cui si adottino B ed J, f e k_f diversi da quelli base si ottiene moltiplicando il risultato della formula successivamente per i rapporti $B/10\,000$, $J/3$, $f/42$ e $k_f/0{,}3$.

B) *formula della caduta di tensione*:

$$\triangle V' \% \cong 6{,}5 \frac{L_m}{s'_{te}} \qquad \text{(II-50)}$$

In questa formula dovremo invece moltiplicare per il rapporto $J/3$ e dividere per $B/10\,000$ ed $f/42$ essendo i due ultimi termini contrastanti agli effetti della caduta con il parametro J.

Come si vede, si possono condurre i calcoli preliminari con le formule semplificate base e quindi modificare i risultati a mezzo di rapporti semplici secondo le occorrenze.

Di grande ausilio sono anche le tabelle, i diagrammi ed i nomogrammi concentrati alla fine di questa pubblicazione ma, se mi è permesso dare un consiglio ai neoprogettisti, vorrei pregarli di servirsene solo saltuariamente e, appena sia loro possibile, condurre i calcoli sulla base di poche formule facili a ritenersi a memoria; eviteranno in questo modo di trovarsi sempre legati alla consultazione delle tabelle e potranno eseguire calcoli in ogni caso e contingenza, sia pure in tempo maggiore, ma con piena consapevolezza dello sviluppo logico del procedimento. E' questo infatti il lato più importante della questione; conoscere da quali grandezze dipenda il risultato e secondo quali rapporti; senza di che ogni più perfezionata tabella o nomogramma diventa priva di significato e, più che utile, dannosa.

A costo di eccedere in pedanteria riassumerò qui di seguito i criteri base da seguire nel progetto di un trasformatore.

1) Determinare con precisione i dati di prestazione del trasformatore e soprattutto esaminare quali siano i dati essenziali perchè il calcolo possa essere impostato; questo allo scopo di poter richiedere immediatamente al cliente il completamento di quei dati che questi, per ignoranza in materia o dimenticanza, non avesse sufficientemente precisato.

Ricordo a questo proposito che per calcolare un trasformatore occorre conoscere:

a) tutte le tensioni e le correnti secondarie oppure potenze e tensioni secondarie ed il cos φ dei vari carichi;

b) la tensione o le tensioni primarie;

c) la frequenza della rete di alimentazione (se più di una frequenza basta generalmente la minima);

d) in caso di costruzioni assoggettate a speciali esigenze, la caduta di tensione da vuoto a carico e la percentuale di corrente a vuoto; eventualmente il massimo sovrariscaldamento ammesso;

e) speciali circostanze come: funzionamento intermittente, possibilità di sovraccarico, fluttuazioni della tensione di alimentazione o della frequenza, particolari condizioni di raffreddamento o di clima ecc. che potranno pure essere utili agli effetti del calcolo.

2) Dai dati suddetti ricavare la potenza primaria a seconda del rendimento e del cos φ′ previsto; quindi la potenza virtuale tenuto conto del coefficiente d'ingombro dell'avvolgimento primario.

3) Scegliere lamierino e pacco da usare; controllare la capacità di esso a contenere la potenza richiesta: mo-

dificare eventualmente l'induzione e corrente specifica per ottenere il risultato o scegliere altri lamierini e dimensioni del pacco.

4) Calcolare le spire/volt in base all'induzione definitivamente determinata e quindi le spire di ogni singolo avvolgimento: determinarne le sezioni del rame secondo la corrente specifica prescelta e le tabelle relative al primario, se questo è a prese multiple.

5) Eseguire gli eventuali calcoli di verifica e i conteggi di peso.

Prospetto di scheda tipo per la normalizzazione del calcolo.

Definito lo schema generale da seguire per il procedimento logico del progetto, meglio ancora se esso sarà permanentemente fissato in una scheda di calcolo che permetta il risparmio di molte scritturazioni, la costante e uniforme disposizione dei vari risultati, la conservazione dei dati in apposito schedario. La scheda eviterà inoltre dimenticanze ed omissioni. In genere ciascuno, specie se di una certa esperienza nel ramo, amerà costruirsi un proprio schema originale: a titolo di esempio riporterò il fac-simile di una scheda tipo usata in un ufficio tecnico milanese, abbastanza completa e di uso pratico. Nelle figg. 22 e 23 ne è riprodotto il recto e il verso.

Sul recto della scheda suddetta sono raccolti in testa i dati richiesti per il trasformatore ed annotazioni di carattere statistico; seguono quindi i dati elettrici e di avvolgimento con a fianco i conteggi relativi alle potenze, spire/volt e caduta di tensione percentuale.

In fondo alla scheda sono raccolti inoltre i dati di impaccaggio, i conteggi del peso e del rendimento effettivo.

Sul verso si riassumono invece i dati rilevati a mezzo di misure elettriche sugli esemplari già costruiti, annotazioni di carattere costruttivo e calcoli di costo del trasformatore completo.

Quest'ultima parte soprattutto potrà subire profonde modificazioni a seconda del sistema adottato dai singoli per i consuntivi. In ogni modo detta parte potrà ottimamente servire anche per preventivi, effettuando questi sui dati di peso del calcolo e scrivendoli in matita per poterli sostituire con dati più dettagliati e precisi delle costruzioni effettivamente realizzate.

Troppo lungo e noioso sarebbe se-

guire passo passo la compilazione di una scheda a scopo esemplificativo; si è quindi preferito illustrarne il pratico impiego, relativamente alla sola 1ª facciata mediante la pubblicazione nelle figg. 24, 25, 26 di tre distinti esempi di calcolo. Il primo di essi si riferisce esattamente al calcolo effettuato al Cap. 11° e ne riporta i dati; gli altri due contengono i calcoli di due caratteristici trasformatori di piccola potenza.

DATI E CARATTERISTICHE RILEVATI A COSTRUZIONE AVVENUTA

Avvolgimento	Tens. a vuoto V.	Carico A.	Tens. a car. V.	ΔV %	Dati rilevati vari
					Iv (160V.) ____ A W. ____ w Sopraelevamento di temperatura dopo 2h. a pieno carico: ____ s. t. a.

Caduta di tensione percentuale media

Ø filo mm.	Peso Kg.	C. unit. L. Kg.	Costo L.
Pcv			
Ferro			

Carcassino e occhielli
Carta e leteroide
Terminali
Calotte
Varie

Avvolgimento
Saldatura
Impaccaggio
Collaudo

COSTO TOTALE

POSIZIONE DEI TERMINALI

Fig. 22 - Scheda tipo per il calcolo dei trasformatori radio. Faccia posteriore.

TRASF. DI ALIMENTAZIONE per ____________ N.° ______

1° Committente ____________ 1ª commessa pezzi n° ______

DATI RICHIESTI: Tens. primario: ____________ f = ______ per sec.

Secondarii: ____________

	Tensione V.	Sc. tens. V.	Corrente A.	Pot. app. VA	Spire N.°	⌀ filo mm.	Copertura tipo	Sez. rame mmq
PRIMARIO								
SECONDARII								

Potenza app. secondaria totale VAs ______ Sezione totale rame Scu ______

PARAMETRI DEL CALCOLO

VAs = ______ VA

coeff. ing. prim. Kp = ______

rendim. presunto η' = ______

fatt. di p. pres. cos φ' = ______

VAp = VAs/η' cos φ' = ______ VA

VAs (1 + Kp/η' cos φ') = ______ VA

Bmax = ______ linee/cmq.

fmin. ______ per./sec.

sez. netta ferro Sfe = ______ cmq.

sp/V = ______

J = ______ Amp/mmq.

ΔV' = ______ %

Lamierino tipo ______ Qualità ______ Carcassino ______

Impaccaggio ______ Peso ferro Pfe = ______ Kg

Scu = ______ cmq. | Lm = ______ cm. | Perd. rame Wcu = 0,02 Vcu J² ______ W

Sfin = ______ cmq. | Vcu = Lm. Scu ______ cmc. | Perd. ferro Wfe = wfe Pfe ______ W

Kf = Scu/Sfin = ______ | Pcu = ______ gr. | Wtot ______ w. η = VAs/VAs + Wtot = ______ %

Fig. 23 - Scheda tipo per il calcolo dei trasformatori radio. Faccia anteriore.

TRASF. DI ALIMENTAZIONE per AMPLIFICATORE X Y Z N.° 2437

1° Committente magazzino 1ª commessa pezzi n° 50

DATI RICHIESTI: Tens. primario: 15 - 0 - 15 - 125 - 165 - 235 - 280 f = 42 - 50 per sec.

Secondarii: 400 + 400 V - 0,15 A c.c. 6,3 V - 3 A 5 V - 3 A 5 V - 2 A

	Tensione V.	Sc. tens. V	Corrente A.	Pot. app. VA	Spire N.°	Ø filo mm.	Copertura tipo	Sez. rame mmq.
PRIMARIO	15-0	15	1,03		56 +	0,75	sm.	
	15	15	1,15.		56 +	''	'	
	125	110	1,31		412 +	''	'	231
	165	40	0,96	144	150 +	0,50	'	30
	235	70	0,65		263 +	0,40	'	
	280	45	0,54		169	''	'	54
SECONDARII	400x2		0,15	60	1660x2	0,30	'	232
	6,3		3,0	19	26	1,20	'	29
	5,0		3,0	15	21	1,20	'	23,5
	5,0		2,0	10	21	0,90	'	13,5
Potenza app. secondaria totale VAs				104	Sezione totale rame Scu			613

PARAMETRI DEL CALCOLO

VAs = 104 VA

coeff. ing. prim. Kp = 1,52

rendim. presunto η' = 0,80

fatt. di p. pres. cos φ' = 0,90

VAp = VAs/η' cos φ' = 144 VA

VAs (1 + Kp/η' cos φ') = 315 VA

Bmax = 10.000 linee/cmq.

fmin. 42 per./sec.

sez. netta ferro Sfe = 14,4 cmq.

sp/V = 3,75

J = 3,0 Amp/mmq.

ΔV' 9,6 %

Lamierino tipo 130 x 120 Qualità spess. 0,5 perdita 2,3 W/Kg. Carcassino 40 x 40

Impaccaggio lamierini sfalsati 2 a 2 Peso ferro Pfe = 3,250 Kg

Scu = 6,13 cmq.	Lm = 23,8 cm.	Perd. rame Wcu = 0,02 Vcu J² = 15,3 W
Sfin = 20 cmq.	Vcu = Lm. Scu = 146 cmc.	Perd. ferro Wfe = wfe Pfe = 9,75 W
Kf = Scu/Sfin = 0,306	Pcu = 1,300 gr.	Wtot 25,05 w. η = VAs/VAs + Wtot = 80,5 %

Fig. 24 - Utilizzazione della scheda tipo per il calcolo del trasformatore del Cap. II

TRASF. DI ALIMENTAZIONE per RADIORICEVITORE 7010 N.° 133

1° Committente Laboratorio sperimentale 1ª commessa pezzi n° 1

DATI RICHIESTI: Tens. primario: 110 - 125 - 140 - 160 - 220 V. f = 42 - 50 per/sec.

Secondarii: 340 + 340 V - 0,075 A c.c. 5 V - 2 A 6,3 V - 2,2 A

	Tensione V.	Sc. tens. V.	Corrente A.	Pot. app VA	Spire N.° progr.	Ø filo mm.	Copertura tipo	Sez. rame mmq
PRIMARIO	110		0,62		495	0,50	sm.	97
	125	15	0,55		562	0,35	'	
	140	15	0,49		630	' '	'	
	160	20	0,43	68,5	720	' '	'	22
	220	60	0,31		990	' '	'	15
SECONDARII	340x2		0,075	25,5	1690 + 1690	0,14	'	52
	6,3		2,2	14	31	0,90	'	20
	5,0		2,0	10	25	0,90	'	16
Potenza app. secondaria totale VAs				49,5	Sezione totale rame Scu			222

PARAMETRI DEL CALCOLO

VAs = 49,5 VA

coeff. ing. prim. Kp = 1,37

rendim. presunto η' = 0,80

fatt. di p. pres. cos φ' = 0,90

VAp = VAs/η' cos φ' = 68,5 VA

VAs (1 + Kp/η' cos φ') = 143 VA

Bmax 10.000 linee/cmq.

fmin. 42 per./sec.

sez. nella ferro Sfe = 12 cmq.

sp/V 4,5

J = 3 Amp/mmq.

ΔV' 10,2 %

Lamierino tipo B Qualità normale 1,6 W/Kg. Carcassino B 40

Impaccaggio lamierini sfalsati 3 a 3 Peso ferro Pfe = 1,840 Kg

Scu = 2,22 cmq.	lm = 19,5 cm.	Perd. rame Wcu = 0,02 Vcu J² = 8 W
Sfin = 8,6 cmq.	Vcu = lm. Scu 43,5 cmc.	Perd. ferro Wfe = wfe Pfe 2,5x1,84 = 4,6 W
Kf = Scu/Sfin = 0,26	Pcu = 390 gr.	Wtot 12,6 w. η = VAs/VAs + Wtot = 80 %

Fig. 25 - Utilizzazione della scheda tipo per il calcolo dei trasformatori radio.

TRASF. DI ALIMENTAZIONE per lampadine 6 V - 25 W N.° 1842

1° Committente X Y Z 1ª commessa pezzi n° 20

DATI RICHIESTI: Tens. primario: 220 V. f = 42 - 50 per sec.

Secondarii: 6,0 V - 4 A.

	Tensione V.	Sc. tens. V.	Corrente A.	Pot. app. VA	Spire N.°	Ø filo mm	Copertura tipo	Sez. rame mmq
PRIMARIO	220		0,16	35	1760	0,24	sm.	79
SECONDARII	6,0		4	24	54	1,20	sm.	61

Potenza app. secondaria totale VA_s 24 — Sezione totale rame S_{cu} 140

PARAMETRI DEL CALCOLO

VA_s = 24 VA

coeff. ing. prim. K_p 1,00

rendim. presunto η' 0,75

jatt. di p. pres. $\cos\varphi'$ 0,90

$VA_p = VA_s / \eta' \cos\varphi'$ 35 VA

$VA_s [1+K_p] / \eta' \cos\varphi'$ 59 VA

B_{max} 11.400 linee/cmq.

$f_{min.}$ 42 per./sec.

sez. netta ferro S_{fe} 6 cmq.

sp/V 8

J = 3,5 Amp/mmq.

$\Delta V'$ 14 %

Lamierino tipo 68 x 57 Qualità spess. 0,5 2,3 W/Kg. Carcassino D 30

Impaccaggio lamierini sfalsati 4 a 4 Peso ferro P_{fe} 0,600 Kg

S_{cu} = 1,4 cmq.	l_m 14,4 cm	Perd. rame W_{cu} 0,02 V_{cu} J 5 W
S_{fin} = 4,0 cmq.	V_{cu} l_m S_{cu} 20 cmc.	Perd. ferro W_{fe} w_{fe} P_{fe} 4 x 0,6 = 2,4 W
$K_f = S_{cu}/S_{fin}$ = 0,35	P_{cu} 180 gr.	W_{tot} 7,4 w. $\eta = VA_s / VA_s + W_{tot}$ = 76 %

Fig. 26 - Utilizzazione della scheda tipo per il calcolo di un trasformatore.

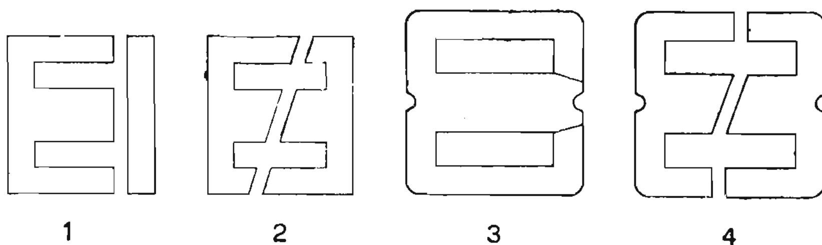
ESECUZIONE MATERIALE

Scelta del tipo di lamierino.

Per la buona costruzione di un trasformatore non è sufficiente eseguire con cura ed esattezza i calcoli matematici: di grande importanza è anche la pratica costruzione dello stesso: darò quindi qualche notizia generale, in buona parte frutto di esperienza personale, sulle norme da seguire nell'esecuzione.

Salvo il caso, eccezionale per altro, che la quantità dei trasformatori da costruire sia tale da giustificare il disegno e l'esecuzione di una attrezzatura particolare per i lamierini, generalmente il costruttore sceglierà il lamierino da usare fra quelli di normale commercio. A questo riguardo egli dovrà stabilire principalmente tre cose:

1) la forma del lamierino;
2) il tipo della spaccatura;
3) la qualità del ferro.



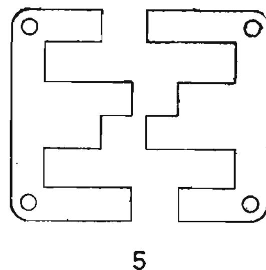


Fig. 27 - Principali forme dei lamierini a mantello per piccoli trasformatori.

Circa la forma lo guideranno nella scelta criteri pratici di montaggio; per la spaccatura terrà conto della facilità di impaccaggio e per quanto concerne la qualità richiederà quella che riterrà opportuna e sufficiente perchè perdite e corrente a vuoto rientrino nei limiti desiderati. I tipi di lamierini che il commercio offre rientrano tutti in quelli rappresentati nella fig. 27.

Esaminiamone pregi e difetti separatamente.

Tipo 1: *Lamierino ad E con listello.* E' questo un tipo di lamierino molto comunemente usato, specie per trasformatori molto piccoli; la tranciatura avviene come schematicamente indicato in fig. 28: con una prima

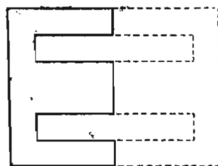


Fig. 28 - Tranciatura dei lamierini ad E con listello.

tranciatura si ottengono due E unite fra loro ed i due listelli; tagliando quindi in mezzo si separano i due lamierini.

Come si vede, con questo sistema di lavorazione non si ha nessun spreco di materiale, essendo i listelli ricavati dalle finestre; le diverse dimensioni del lamierino risultano però automaticamente determinate in funzione della larghezza del nucleo centrale: i rapporti dimensionali, come facilmente si può ricavare, sono quelli segnati nella fig. 29. Economicamente questa forma è indubbiamente la più vantaggiosa: per grandi dimensioni però la quantità di rame contenibile nella finestra diventa troppo

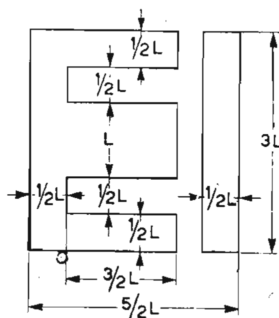


Fig. 29 - Rapporti dimensionali dei lamierini ad E con listello.

esigua e ciò obbliga ad aumentare il peso del ferro a scapito dell'economia generale di costruzione. I trasformatori più piccoli infatti, cui competono fili più sottili e di costo unitario più alto, riescono economici con forti rapporti peso ferro/peso rame; nelle costruzioni di maggior mole tale rapporto si sposta notevolmente dato che il costo unitario del rame diminuisce fortemente mentre quello del ferro rimane costante e talvolta aumenta.

Nei riguardi dell'impaccaggio, questo è facilissimo; il traferro ottenibile è generalmente abbastanza piccolo.

Per ovviare all'inconveniente citato della scarsa disponibilità di spazio qualche costruttore ha fatto astrazione dalla norma generale di tener costante la sezione del circuito magnetico, costruendo le gambe esterne dell'*E* ed il relativo listello di dimensioni maggiori di $L/2$: ciò crea qualche difficoltà nel computo esatto della se-

zione effettiva del circuito magnetico, dovendosi tener conto della differenza citata: ma ciò non ha soverchia importanza. Recentemente si è anzi avuta una iniziativa nel senso di unificare detto tipo di lamierino con una dimensione dello spazio utile di finestra pari a 0,6 L: idea che potrà avere successo, sebbene anche con questa piccola variante lo spazio per il rame risulti sempre un po' esiguo.

Si noti inoltre che il lamierino senza sfrido, del tipo illustrato ora, riesce economicamente più conveniente per i grandi formati che non per i piccoli: e ciò per il fatto che lamierini piccolissimi di tipo diverso possono essere ricavati da sfridi di grandi tranciature mentre il tipo ad E con listello, per le sue caratteristiche, esige di essere tranciato da liste regolari assai più costose, anche tenendo conto dell'enorme scarto nella tranciatura da ritagli. Nei lamierini di formato normale o grande, invece, l'utilizzazione di ritagli non è generalmente possibile e il vantaggio economico va quindi al tipo ad E con listello.

Tipo 2: *Lamierini a E a gambe disuguali.* Anch'essi usati in genere solo per piccole dimensioni: in essi non esiste alcuna limitazione ai rapporti dimensionali: il notevole sfrido ne limita l'uso alla utilizzazione di ritagli di lamiera.

Per l'impaccaggio la facilità è paragonabile a quella del precedente; ugualmente dicasi per il traferro.

Tipo 3: *Lamierini in un sol pezzo con spaccatura.* Magneticamente è la forma più conveniente: in questi lamierini il traferro può considerarsi trascurabile ed in ogni caso è sempre molto minore che nei precedenti tipi: lo spazio per il passaggio dei tiranti (montaggio con calotte) è ricavato senza alcun pregiudizio dalla sezione di passaggio del flusso: queste ottime qualità tecniche sono però bilanciate dallo svantaggio del difficoltoso impaccaggio e dal maggiore costo rispetto al tipo 1 causa lo scarto di materiale.

Tipo 4: *Lamierini a doppio E.* Strutturalmente simili al tipo 2 salvo che per la presenza delle gole per il passaggio dei tiranti: servono per costruzioni di media grandezza in montaggio con cavallotto o calotte indifferentemente: vantaggi e svantaggi sono quelli del tipo 2: la costruzione del ferro trancia relativo deve essere molto accurata perchè non accada che due gambe vadano a contatto e la terza rimanga distaccata creando un traferro, tanto più che se ciò accade per la gamba centrale non è facile accorgersi dell'inconveniente nell'operazione di impaccaggio.

Tipo 5: *Lamierini ad E diseguali con fori per tiranti.* Tipo di lamierino per grossi trasformatori (da 100 VA

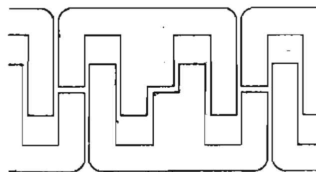


Fig. 30 - Espediente per ridurre lo sfrido nella tranciatura dei lamierini.

in su). I fori per i tiranti sono dannosi per la strozzatura che creano nel circuito magnetico ma sono indispensabili dato che il montaggio con cavallotti non riesce più consigliabile: lo sfrido può essere attenuato se la tranciatura viene eseguita come in fig. 30.

Impaccaggio dei lamierini.

Nei trasformatori di alimentazione l'impaccaggio deve essere eseguito sfalsando i lamierini in modo da non creare un traferro continuo; lo sfalsamento può essere eseguito lamierino per lamierino oppure più comodamente a pacchetti di 2, 3, 4, 5 lamierini. Con lamierini isolati su ambedue le facce il 1° sistema è il migliore sebbene il più laborioso: con lamierini isolati su di un solo lato il risultato però può essere migliore con il sistema a pacchetti dato che due lamierini contigui sfalsati si troverebbero ad avere affacciati i lati non isolati, comportandosi come un solo lamierino di spessore doppio.

Infilando gli ultimi lamierini nel pacco si abbia cura di interporre tra il carcassino ed il lamierino da infilare un listello metallico fisso per proteggere il primo da graffiature che potrebbero compromettere l'isolamento dell'avvolgimento.

Si eviti anche di esagerare nel forzamento dei lamierini; questo potrebbe produrre una deformazione dell'avvolgimento ed un allargamento permanente delle spire, con il risultato che, a pacco stretto, queste potrebbero vibrare per effetto elettrodinamico.

Serraggio del pacco.

E' molto importante pressare il pacco perchè in funzionamento i lamierini non vibrino: la tendenza a vibrare è naturalmente tanto più accentuata quanto più alta è l'induzione con la quale il trasformatore è stato progettato.

Nel montaggio con tiranti è sempre possibile aumentare la pressione del pacco: con cavallotti invece si esige una pressa per il serraggio perfetto.

Il materiale costituente le calotte e le fasce è preferibile non sia magne-

tico ad evitare circolazione di flusso attraverso di esso con dispersione ed aumento delle perdite; dato però che il ferro è il materiale che meglio si adatta per la costruzione di questi accessori conviene evitare questi inconvenienti mediante interposizione, tra il pacco e le calotte, di spessori di cartone che creino un traferro sufficiente allo scopo. Questa norma è bene sia seguita specialmente quando il pacco viene stretto fra una calotta ed il piano di un telaio in ferro: si eviterà così di creare fughe di flusso sul telaio stesso con dannosi concatenamenti con altri trasformatori di B.F.

In costruzioni accurate è conveniente isolare anche i tiranti, a mezzo di tubetti, entro i fori del pacco; questa norma va seguita anche se i tiranti sono di materiale non magnetico, essendo lo scopo quello di evitare il corto circuito delle lamelle agli effetti delle perdite per correnti parassite.

Supporto per l'avvolgimento.

Si distinguono due tipi di supporti: con sponde e senza sponde (figura 31). La preferenza per l'uno o per l'altro tipo dipende quasi esclusivamente dalle particolari simpatie del costruttore e dalla sua particolare attrezzatura piuttosto che non da una superiorità tecnica effettiva di un tipo sull'altro.

Il supporto con sponde offre un migliore appiglio per il fissaggio dei terminali ed una leggermente maggiore utilizzazione della finestra; inoltre l'isolamento laterale tra avvolgimento e ferro è ben assicurato.

Il supporto senza sponde offre per contro i vantaggi di una maggiore semplicità, permette una facile impregnazione dell'avvolgimento, ove la si pratichi, nonchè il controllo, ad avvolgimento terminato, delle spire che eventualmente fossero scivolate lateralmente. Si usa in genere per costruzioni di piccolissima serie (con costruzione del supporto di volta in volta) o di grandissima serie (con studio accurato dell'amarraggio dei fili). Per costruzioni di medie quantità prevalgono invece in genere i vantaggi del tipo con sponde. Tanto nell'un tipo che nell'altro il nocciolo deve essere molto robusto, per evitare deformazioni dell'avvolgimento

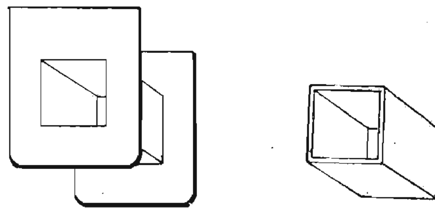


Fig. 31 - Supporti per avvolgimenti con e senza sponde.

nell'operazione di impaccatura: in quelli senza sponde si usa talvolta un rinforzo interno in ferro, ottimo sotto ogni aspetto, che bisogna aver cura però di interrompere longitudinalmente (fig. 32) per evitare la formazione di una spira in c.c. Sui due lati che risultano normali al piano delle lamelle due spessori di lateroide eviteranno di porre in cortocircuito queste ultime.

Altra striscia di lateroide va naturalmente posta tra il primo elemento del pacco e il lato spaccato se questo risulta parallelo al piano dei lamierini.

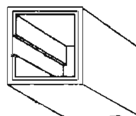


Fig. 32 - Rinforzo metallico interno nei supporti per avvolgimento.

Disposizione degli avvolgimenti.

E' in genere indifferente il come gli avvolgimenti sono disposti tra di loro: il sistema ad avvolgimenti affiancati (fig. 33) è però oggi quasi abbandonato per le difficoltà che si incontrano nella costruzione; permane solo in qualche costruzione speciale o nei trasformatori economici (da campanello, ad es.) in cui l'avvolgimento viene eseguito alla rinfusa.

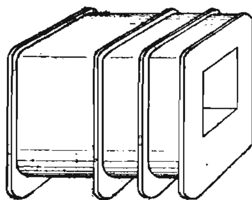


Fig. 33 - Avvolgimento a sezioni affiancate.

Di uso generale è il sistema ad avvolgimenti sovrapposti ed in questo caso considerazioni economiche consiglierebbero di disporre per primi gli avvolgimenti con filo più sottile: va notato però che le inevitabili deformazioni cui va soggetto il supporto nell'impaccaggio si ripercuotono in misura più notevole sui primi strati che non sui successivi, talchè potrebbe conseguirne la rottura di qualche spira. Il sistema non è pertanto raccomandabile che nel caso di supporti rinforzati.

Si è quindi generalizzato l'uso di avvolgere per primo il primario, quindi i secondari ad alta tensione ed infine quelli a B.T.

Isolamento fra gli strati.

Ogni strato di filo avvolto deve essere isolato rispetto al successivo, il che si ottiene con carta speciale, con cartoncino presspan, con lateroide ed in qualche caso con tela o seta sterlingata. Lo spessore e quindi la robustezza dell'isolante è in diretta dipendenza del diametro del filo da av-

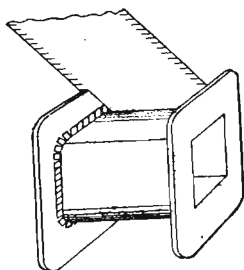


Fig. 34 - Isolamento fra gli strati con carta frastagliata ai bordi.

volgere: si passa così dalla carta di spessore 0,02 mm per i fili più sottili (∅ massimo $0{,}12 \div 0{,}15$ mm) agli spessori di $0{,}2 \div 0{,}3$ in lateroide per avvolgimenti pesanti (fili superiori al millimetro).

Lo spessore e la rigidità dell'isolante interposto deve essere tale da impedire che il filo possa deformarlo o tagliarlo, andando così ad insinuarsi nello strato sottostante: si tratta quindi più di un problema di rigidità meccanica che non elettrica, essendo questa sempre esuberante a meno che difetti e falle non la compromettano.

Grande cura deve essere posta invece nell'isolamento fra un avvolgimento ed il successivo, da esso elettricamente separato; possono verificarsi casi in cui fra l'ultimo strato di un avvolgimento ed il primo del successivo siano presenti d.d.p. notevolissime o si vengano creando in seguito a fenomeni transitori; per cui non si raccomanderà mai abbastanza di esagerare in questo isolamento.

Negli avvolgimenti su supporti senza sponde occorre che l'avvolgimento sia mantenuto più stretto della carta di $4 \div 5$ mm per parte; questa misura potrà essere leggermente minore negli avvolgimenti con sponde, specie se si farà uso di carta più larga del necessario, spizzettandola ai bordi in modo che essa venga a formare un canale (fig. 34) evitando lo scivolamento delle spire.

Uscita dei fili e ammarraggio dei terminali.

E' questo il punto più delicato della costruzione e da esso dipende talvolta la buona o cattiva riuscita del trasformatore.

Per il fissaggio dell'estremità di ogni avvolgimento si usa normalmente il sistema della fettuccia di cotone (fig. 35): in questa, ripiegata a formare occhiello e affrancata sotto alcune spire, verrà infilato il capo estremo del filo e quindi, tirando la fettuccia, si immobilizzerà il conduttore. Negli avvolgimenti con sponde questi potrà poi uscire, protetto da tubetto isolante, da un foro del carcassino per andarsi a saldare su terminali opportunamente disposti sulle sponde del carcassino stesso.

Va notato che l'uscita con fili di piccolissima sezione (minori di 0,15 mm di diametro) non è raccomandabile: occorre in questi casi saldare ad essi un filo o una trecciola di sezione maggiore (ma non troppo per non creare punti deboli nel passaggio dall'una all'altra sezione); isolare bene la giunta con carta o tela, avvolgere qualche spira ancora ed effettuare l'uscita come sopra. Non si usi mai nastro adesivo a contatto coi fili sottili; l'adesivo contiene in genere sostanze acide che a lungo andare corrodono il conduttore.

Nelle giunzioni terminali o comunque interne occorre che la saldatura dei fili sia perfetta: *non si userà quindi assolutamente pasta per saldare* o altri ingredienti corrosivi e si avrà cura che nella saldatura non si abbiano a formare punte di stagno.

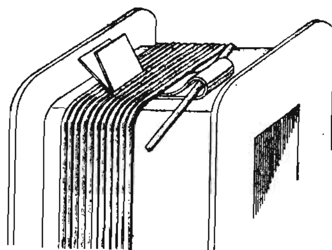


Fig. 35 - Ammarraggio del filo al termine di un avvolgimento.

Negli avvolgimenti senza sponde occorre invece procedere diversamente: si potrà scegliere una delle soluzioni seguenti:

a) Creare in qualche modo un supporto per i terminali solidale con gli avvolgimenti e procedere quindi come detto precedentemente;

b) uscire direttamente dall'avvolgimento con trecciole flessibili da lasciarsi libere;

c) far sporgere delle linguette metalliche sufficientemente rigide su lati dell'avvolgimento ed a queste saldare i fili flessibili.

La seconda soluzione è la meno impegnativa: basta infatti procedere come per le uscite dei fili sottili salvo che al posto del filo massiccio si

userà trecciola flessibile e non si avvolgeranno spire con essa ma la si affrancherà subito dopo la saldatura.

Il sistema è semplice ma ingombrante e di non sicuro affidamento **se l'ammarraggio della trecciola non** è effettuato in modo perfetto e la saldatura assicurata in modo da non risentire delle sollecitazioni impresse al flessibile.

Il terzo sistema è il più complesso ma certamente migliore dei precedenti: può essere risolto con accorgimenti diversi ma fondamentalmente uguali; la fig. 36 ne illustra uno.

Una linguetta in lateroide sottile di un paio di cm di larghezza viene disposta sotto l'ultimo strato dell'avvolgimento. Nel suo interno è incollata una sottile striscia di ottone di 5 ÷ 6 mm di larghezza.

Terminato l'avvolgimento, si solleva il bordo superiore del lateroide, si salda il filo alla linguetta avendo cura di non tendere troppo il filo e di non fare uno spessore troppo grosso di stagno; si ricopre la saldatura con il lembo sollevato e si procede all'apposizione dell'isolamento per l'avvolgimento successivo.

Il sistema si presta egregiamente per fare prese di un avvolgimento eseguito con filo di diametro costante, non crea sensibili ingrossamenti locali e dà luogo ad un terminale estremamente robusto, specie se l'avvolgimento terminato verrà sottoposto a impregnazione di vernice.

Le linguette sporgenti dall'avvolgimento potranno poi essere ripiegate ad occhiello per saldarvi terminali flessibili di collegamento.

Quando il filo costituente l'avvolgimento è di forte sezione (secondari a forte amperaggio) lo si potrà affrancare con nastro cotone e farlo uscire direttamente a lato praticandovi un ricciolo per la saldatura.

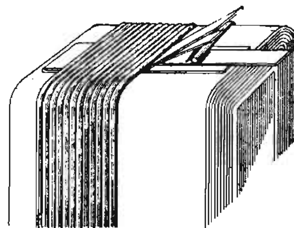


Fig. 36 - Esecuzione di una presa negli avvolgimenti con supporto senza sponde.

Se usando calotte l'ingombro laterale di questi terminali riuscisse eccessivo, si potranno evitare occhielli e ricci effettuando le saldature di piatto sui terminali ripiegati ad angolo retto.

Tensione del filo nell'avvolgimento.

Durante l'operazione di avvolgimento il filo dovrà essere ben teso: questo sia allo scopo di ottenere un avvolgimento compatto, sia per evitare vibrazioni nelle spire. E' noto infatti che due spire contigue percorse dalla stessa corrente vengono sollecitate a separarsi per effetto elettrodinamico; il fenomeno è cospicuo negli avvolgimenti in cui circolano for-

ti correnti (secondari B.T. in genere) ed è appunto a questi che vanno dedicate le maggiori cure.

D'altra parte non bisogna esagerare nella tensione per evitare rotture di fili o eccessiva sollecitazione degli strati isolanti sottoposti; la giusta misura è un dato della pratica e solo l'esperienza la può insegnare.

Avvolgimento di fili in parallelo.

Capita spesso negli avvolgimenti B.T. che essi occupino solo una parte di strato completo; ciò può essere d'incomodo per l'avvolgimento di altro secondario al disopra del primo: o può darsi anche che lo spessore dello strato così eseguito sia eccessivo. In tale caso è preferibile allargare lo spazio occupato fino ad uno strato completo riducendone contemporaneamente lo spessore.

Ciò si può ottenere quasi sempre eseguendo l'avvolgimento con due fili ciascuno di sezione pari a metà di quella calcolata. Si debba ad esempio eseguire, su di una larghezza lorda di 52 mm, un secondario di 25 spire da 1,0 mm. Tenuto conto di una distanza di sicurezza nelle testate di 6 mm, la larghezza utile di avvolgimento sarà di 40 mm. Di questi il nostro secondario (tenuto conto anche dello spessore dello smalto) non ne occuperà che 28 ca. lasciando uno spazio inutilizzato di 12 mm.

Potremo invece usare due fili in parallelo di 0,7 mm di diametro la cui sezione complessiva è ancora pari a quella di un sol filo da 1 mm; la larghezza ricoperta sarà appunto di ca. 40 mm occupando totalmente lo strato e realizzando un risparmio di spessore di 0,3 mm il quale, se non è gran cosa, è però molto utile quando lo spazio disponibile sia estremamente misurato.

Il raddoppio del filo risulta sempre possibile quando lo spazio occupato dall'avvolgimento con filo unico sia pari o inferiore al 70 % dello spazio utile disponibile.

Impregnazione degli avvolgimenti.

L'umidità è la peggiore nemica degli avvolgimenti: proteggerli da essa deve essere la prima preoccupazione del buon costruttore. A questo scopo l'impregnazione dell'avvolgimento finito con adatte vernici isolanti è la migliore misura da prendere.

Senza entrare in merito alla qualità delle vernici da usare, sulla quale lo stesso fornitore potrà dare consi-

gli al costruttore, ricorderò soltanto che, perchè l'impregnazione riesca veramente utile, deve essere eseguita con tutte le prescrizioni del caso altrimenti si corre il rischio di fare peggio.

La norma essenziale dell'operazione è quella di liberare completamente l'avvolgimento da ogni traccia di umidità prima di eseguire l'impregnazione, mediante riscaldamento per un tempo sufficiente e possibilmente sotto vuoto. Senza questa precauzione l'umidità propria verrà definitivamente occlusa nel trasformatore dal bagno di vernice ottenendosi un risultato diametralmente opposto a quello che si desidera realizzare.

Parte IV

C O L L A U D O

CAPITOLO QUATTORDICESIMO

PROVE DI LABORATORIO

Prove preliminari per la determinazione delle caratteristiche del ferro.

Si è già accennato alla difficoltà di conoscere con esattezza le caratteristiche dei lamierini da impiegarsi nella costruzione: se la partita di ferro da usarsi è di una certa importanza val senz'altro la pena di eseguire una prova preliminare su campioni prelevati a caso allo scopo di determinare i due principali fattori che caratterizzano il circuito magnetico: la corrente magnetizzante e le perdite.

Per eseguire queste prove non è necessario eseguire un avvolgimento avente caratteristiche esattamente uguali a quelli da costruirsi: è perfettamente sufficiente preparare un avvolgimento avente un numero di spire, in relazione al nucleo impiegato, corrispondente alla tensione e induzione alla quale si vuole eseguire l'esperimento. Le dimensioni del nucleo potranno anche essere qualsiasi e non eguali a quelle che effettivamente si impiegheranno.

Per l'esecuzione delle misure sul ferro e per quelle che seguiranno occorre disporre di:

- 1 wattmetro elettrodinamico a portata ampermetrica bassa (0,5÷1 A) e portata voltmetrica adeguata alla tensione impiegata;
- 1 ampermetro a portata bassa (0,5 ÷ 1 A) per c.a.;
- 1 voltmetro di portata sufficiente per la tensione di misura a c.a.

Tutti questi strumenti dovranno avere una certa precisione, se si vuole che i risultati siano attendibili; noteremo inoltre che l'ampermetro sarà bene sia del tipo elettromagnetico, a termocoppia o elettrodinamico; con essi si ottiene in ogni caso l'esatto valore della corrente efficace mentre i tipi a bobina mobile con raddrizzatore, la cui indicazione è proporzionale al valore medio della corrente, possono dare indicazioni errate, specie per induzioni elevate, causa il notevole scostamento della forma d'onda da quella sinusoidale che si veri-

fica nella corrente a vuoto per effetto della saturazione del ferro.

Per l'esecuzione pratica della misura si userà lo schema della fig. 37 sempreché il consumo del voltmetro sia trascurabile. Si eseguiranno alcune letture dei tre strumenti a diverse tensioni nell'intorno di quella corrispondente all'induzione prevista; questo per poter variare eventualmente, con consapevolezza, il valore dell'induzione che si adotterà per il calcolo.

Il rapporto fra tensione applicata ed induzione nel ferro si ricaverà facilmente dalla solita relazione.

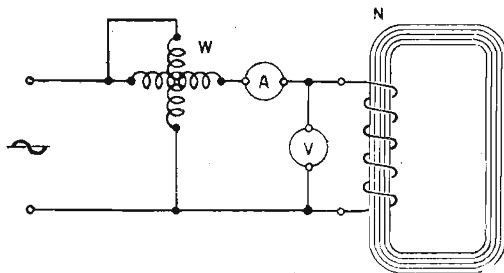


Fig. 37 - Inserzione degli strumenti per la misura delle caratteristiche del ferro.

$$V = 4{,}44\ B_{max} \cdot s_{fe} \cdot f \cdot N \cdot 10^{-8} \quad \text{(IV-1)}$$

che opportunamente disposta fornisce:

$$B_{max} = 10^{8} \frac{V}{4{,}44 \cdot f \cdot N \cdot s_{fe}} \quad \text{(IV-2)}$$

dove N è il numero delle spire avvolte e s_{fe} la sezione netta del nucleo magnetico usato.

La lettura dell'ampermetro ci fornirà direttamente il valore della corrente a vuoto; quella del wattmetro le perdite approssimative nel ferro; approssimative dico perchè nell'indicazione del wattmetro sono comprese anche le perdite per effetto Joule nel rame dell'avvolgimento dovute alla corrente a vuoto in esso circolante. Perchè queste ultime possano ritenersi trascurabili rispetto alle perdite nel ferro occorrerà avere la precauzione di rendere minima la resistenza dell'avvolgimento stesso, riempiendo al massimo possibile lo spazio disponibile per il rame. In ogni caso tali perdite potranno essere conteggiate a parte, conoscendo la resistenza dell'avvolgimento, e quindi sottratte dall'indicazione wattmetrica.

A titolo di esempio, si supponga di avere eseguito le prove su di un circuito magnetico della sezione 3×3 cm, del peso di 1,200 kg con un avvolgimento di 600 spire, di resistenza 4,2 ohm, alla frequenza di 42 Hz ed alla tensione di 100 V. Le rispettive indicazioni del wattmetro e dell'ampermetro siano state di 4,2 W e 0,27 A. La perdita Joule nell'avvolgimento sarà quindi di $0{,}27^2 \times 4{,}2 = 0{,}3$ W circa. Come si vede, esse sono trascurabili: detraiamole però comunque dai 4,2 W della perdita a vuoto e otterremo per la perdita nel ferro la cifra di 3,9 W.

Il lamierino in prova aveva quindi una perdita specifica di 3,9/1,2 = = 3,25 W/kg (alla frequenza di 42 Hz).

L'induzione alla quale la prova è stata effettuata risulta (tenendo conto di un coefficiente di stipamento lamierini = 0,9) di:

$$B_{max} = 10^8 \frac{100}{4{,}44 \times 42 \times 600 \times 9 \times 0{,}9} =$$

$$= 11\,100 \text{ linee/cm}^2$$

Dai risultati delle misure potremo trarre utili indicazioni per il valore da adottare nel calcolo per l'induzione affinchè perdite e corrente a vuoto rientrino nei limiti massimi fissati.

Naturalmente perchè la prova possa avere significato pratico essa dovrà essere condotta su alcuni pacchi lamiere ottenuti prelevando campioni in punti diversi della partita; se i diversi risultati saranno molto vicini fra loro se ne farà una media, ma se le differenze dovessero riuscire cospicue converrà attenersi prudenzialmente ai risultati peggiori.

Per poter riportare i dati ottenuti con un determinato pacco al caso di diversa misura dello stesso ma con il medesimo tipo di lamierino si noterà che:

1) Per le perdite nel ferro non si ha che moltiplicare per il peso del pacco effettivo la perdita unitaria misurata e calcolata;

2) A parità di tensione e di induzione la corrente a vuoto aumenta in proporzione allo spessore del pacco.

Dovendo eseguire prove di controllo in tempi diversi su successive forniture di lamiera sarà molto comodo costruirsi in partenza avvolgimenti di prova per ciascun tipo di lamierino di normale uso, annotando su di essi numero delle spire e resistenza; il lavoro fatto una volta tanto servirà in ogni contingenza futura.

Prova di isolamento.

In fatto di isolamento di un trasformatore si possono distinguere tre casi principali:

1) isolamento di un avvolgimento rispetto agli altri;
2) isolamento di ogni avvolgimento rispetto al ferro;
3) isolamento interno fra strato e strato e fra spira e spira di un avvolgimento.

Nel primo e nel secondo caso si verifica il buon isolamento fra le varie parti applicando fra di esse una tensione elevata, generalmente alternata e della stessa frequenza di quella di lavoro del trasformatore e constatando che non si abbia scarica. La tensione da applicarsi dovrebbe essere, secondo le norme C.E.I., di $2\,E + 1000\,V$ ove E è la f.e.m. del-

l'avvolgimento in prova, o, nel caso di prova di isolamento fra due avvolgimenti, di quello a tensione più elevata. Recenti norme prescrivono inoltre che la tensione minima di prova debba essere di 2000 V qualora il valore di $2E + 1000$ ne sia inferiore.

Senza voler in alcun modo criticare questa prescrizione è bene osservare però che essa, che ben si adatta a costruzioni di grandezza normale, risulta spesso eccessiva per i piccoli trasformatori talchè una prova a 1500 V può ritenersi in genere più che sufficiente. Naturalmente, se la costruzione può essere prevista per un isolamento superiore sarà tanto meglio per la vita del trasformatore.

Mentre le prove di isolamento 1 e 2 sono semplici ad eseguirsi, non necessitando che di un adatto trasformatore di prova capace di fornire la tensione richiesta, la prova 3 non viene normalmente eseguita per le difficoltà che essa presenta. Per effettuarla occorrerebbe applicare ad ogni avvolgimento una tensione pari ad almeno $3 \div 5$ volte quella di lavoro in modo che tra spira e spira e strato e strato si abbiano delle tensioni proporzionalmente superiori a quelle di normale funzionamento.

Non è però possibile effettuare questa prova alla stessa frequenza di lavoro, dato che con tali sovratensioni la saturazione del ferro richiamerebbe negli avvolgimenti una enorme corrente, non sopportabile neanche per un breve istante.

Si può girare la difficoltà aumentando la frequenza della tensione di prova nello stesso rapporto tensione di prova/tensione di lavoro (ved. formula (IV-2)) in modo che l'induzione nel ferro sia quella normale; ciò però significa adoperare per la prova tensioni di frequenza $150 \div 250$ Hz all'incirca che non sono facilmente producibili.

Qualora il costruttore volesse attrezzarsi per questo genere di collaudo occorrerebbe far ricorso o ad un vero e proprio oscillatore di BF, opportunamente amplificato in potenza fino a fornire almeno una cinquantina di VA, oppure ad un gruppo motore asincrono-alternatore di piccola potenza (100 VA).

L'alternatore dovrà avere naturalmente un numero di poli, rispetto a quello del motore, che stia nel rapporto di frequenza desiderato.

La pratica del collaudo di isolamento è la seguente: per le prove tipo 1 e 2 si deriveranno dal trasformatore di prova ad alta tensione due reofori, con fili e puntali abbondantemente isolati di cui uno verrà applicato stabilmente ad uno dei due punti fra cui si vuol verificare l'isolamento mentre con l'altro si solleciterà intermittentemente l'altro punto. La comparsa di una decisa scintilla all'atto del contatto o del distacco segnalerà la presenza di cortocircuito o di una scarica interna. L'inserzione di una resistenza in serie al circuito in funzione di limitatrice della corrente di scarica può essere utile per non danneggiare il trasformatore in prova: essa sarà senz'altro necessaria qualora si voglia prolungare la prova, come prescritto, per 1'.

Nel caso di controllo a intermittenza la resistenza può anche essere omessa data la brevissima durata dell'eventuale cortocircuito: generalmente poi l'impedenza del trasformatore di prova provvede già ad una notevole limitazione.

Sia nel caso di applicazione intermittente che continuata della tensione di collaudo si può rilevare il difettoso isolamento mediante una lampadina in serie al circuito, capace di accendersi alla corrente di cortocircuito e di sopportarla senza bruciarsi. Si noti che le lampadine al neon non sono assolutamente adoperabili in questo caso a causa della loro sensibilità alle piccole correnti di capacità, capacità che è sempre sensibile, specie fra due avvolgimenti contigui. Lo schema di un'apparecchiatura completa di prova per isolamento è illustrata dalla fig. 38 con i valori dei suoi componenti.

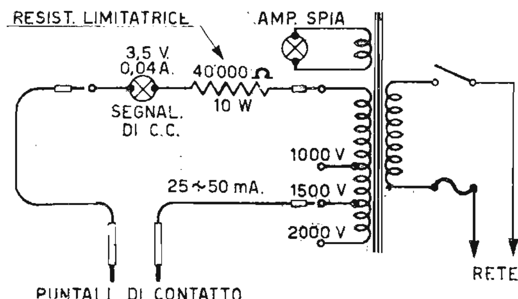


Fig. 38 - Apparecchiatura per la prova dell'isolamento.

Naturalmente appena segnalato il cortocircuito si dovrà interrompere la corrente al trasformatore di prova per evitare danneggiamento della resistenza limitatrice e del trasformatore di prova stesso, elementi che è inutile dimensionare per la potenza di scarica data la sua brevità.

Per le prove del tipo 3 si applicherà invece la sovratensione di collaudo inserendo in circuito un amperometro di portata adatta e traendo induzioni dall'eventuale maggiore indicazione di questo, rispetto a quella avutasi su un trasformatore campione, circa la presenza di spire o strati scaricanti fra loro. Si noti che variazioni della frequenza e della tensione di prova provocano notevoli spostamenti nel valore della corrente a vuoto: talchè la prova dovrà essere eseguita commutando rapidamente dal trasformatore campione a quello in prova, senza tener conto del valore assoluto della corrente.

Dato che la corrente magnetizzante del trasformatore può impedire l'accertamento delle perdite di piccola entità (poche spire in cortocircuito) è preferibile usare per la prova frequenze molto superiori a quella necessaria per ottenere l'induzione effettiva di lavoro, in modo da limitare moltissimo la corrente magnetizzante.

Queste difficoltà pratiche fanno sì che, come si è detto, la prova di sovratensione venga trascurata, limitandosi eventualmente a riscontrare la presenza di cortocircuiti interni nelle altre prove di cui parleremo appresso.

Prova a vuoto.

Prima di eseguire le prove del trasformatore nelle reali condizioni di funzionamento si esegue generalmente la prova di misura delle tensioni e dell'assorbimento a vuoto.

Per la misura delle tensioni ci si servirà di un voltmetro a c.a. a diverse portate la cui precisione può anche essere modesta purchè si abbia la possibilità di confrontare le misure eseguite sul trasformatore sotto collaudo con altre fatte su un trasformatore campione, riscontrato perfetto. La misura delle tensioni a vuoto ha importanza particolarmente per il primario, quando questo ha varie prese: se la tensione di alimentazione è esattamente quella corrispondente alla presa collegata, la normalità della tensione sulle altre prese permette di constatare con sicurezza se nell'avvolgimento non siano state avvolte per caso meno o più spire di quelle calcolate (il che talvolta avviene). Lo stesso dicasi per le tensioni secondarie.

Anche la misura della corrente assorbita a vuoto è di grande utilità per giudicare il trasformatore, e in qualche caso ci si limita a questa per il collaudo.

Perchè il trasformatore possa essere ritenuto accettabile la corrente a vuoto non deve scartare di più del 10 % circa da quella relativa ad un trasformatore dello stesso tipo preso come campione: se si avessero delle differenze maggiori occorrerà verificare più completamente il trasformatore oppure le condizioni di alimentazione.

A questo riguardo notiamo che una eccessiva corrente a vuoto può essere provocata dalle seguenti cause:

relativamente all'alimentazione:

1) tensione di alimentazione eccessiva;
2) frequenza di alimentazione scarsa;

se le condizioni di alimentazione anzidette sono regolari:

3) numero delle spire primarie inferiore a quello stabilito;
4) qualità del ferro diversa da quella stabilita;
5) cortocircuito parziale in qualche avvolgimento.

Le condizioni 1 e 2 possono essere verificate rispettivamente con un voltmetro e un frequenzimetro: ricordo che tensione e frequenza devono essere misurate con precisione dato che la corrente a vuoto varia grandemente per piccole variazioni di esse. Posto che la tensione e frequenza di alimentazione siano regolari l'eccesso di corrente a vuoto potrà essere dato da una delle cause $3 \div 5$. Per poter determinare da quale di esse dipenda

effettivamente occorrerà effettuare delle prove supplementari come segue:

A) Si alimenti il trasformatore, anzichè sul primario, su di un secondario con la tensione a vuoto ad esso corrispondente; si misuri la tensione sul primario incriminato. Essendo estremamente improbabile che ambedue gli avvolgimenti siano stati eseguiti con una diminuzione proporzionale di spire, una lettura di tensione inferiore a quella nominale del primario indicherà un numero di spire avvolte minore del necessario e potrà anche dare la misura percentuale nella diminuzione.

B) Si cambino i lamierini del trasformatore con quelli del trasformatore campione: se la corrente a vuoto diventa regolare o quasi il difetto è da attribuirsi al ferro, in caso diverso questa causa non sussiste.

C) Nel caso che le due prove suddette abbiano dato esito negativo, non resta che attribuire il difetto a spire in cortocircuito in qualche avvolgimento.

Le cause 1, 2, 3, 4 producono un aumento della potenza reattiva assorbita dal trasformatore: la causa 5 un aumento vistoso della potenza reale. Giovandosi di questo fatto si può, misurando la potenza assorbita con un wattmetro, dirimere facilmente la causa 5 dalle altre dato che le prime quattro provocheranno un piccolo scarto dell'indicazione del wattmetro rispetto a quella normale (perdite nel ferro) mentre la causa 5 provocherà un aumento sensibilissimo nella misura. Per l'inserzione del wattmetro valgono le norme già segnalate precedentemente. Ovviamente una scarsa corrente a vuoto può dipendere dalle cause sopraelencate in senso opposto, con esclusione naturalmente della causa 5. Le prove supplettive per la verifica sono ancora le stesse, con le opportune deduzioni.

Prove sotto carico: misura delle tensioni.

Per caricare il trasformatore la cosa migliore è quella di collegarlo ad un circuito utilizzatore esattamente simile a quello su cui è destinato a funzionare; se questo non è possibile converrà ricorrere ad uno o più carichi fittizi, rappresentati da resistenze pure, capaci di assorbire alla tensione di lavoro correnti uguali a quelle nominali di ogni secondario. Il valore della resistenza ohmica di ogni singolo resistore verrà calcolato con la nota legge di Ohm e così il wattaggio perchè abbiano a sopportare il carico imposto.

Sul trasformatore così caricato si

eseguiranno le misure delle tensioni secondarie che dovranno risultare quelle previste. Se così non è e la misura delle stesse tensioni a vuoto non ha rivelato un errore nel numero delle spire, non resta che attribuire la causa ad una errata sezione del filo con conseguente variazione della caduta di tensione.

Altra prova, che però viene effettuata di regola solo su campioni e secondario. Se la resistenza (a caldo) dei resistori usati è ben nota può bastare il solo ampermetro o il solo voltmetro, ricavandosi la potenza assorbita con la legge di Ohm ($W = R I^2$ oppure $W = V^2/R$).

Detta W_s la somma delle potenze parziali assorbite dai diversi secondari, W_p l'indicazione del wattmetro, e V_p, A_p rispettivamente le indicazioni del voltmetro e ampermetro inseriti sul primario, sussistono le seguenti relazioni:

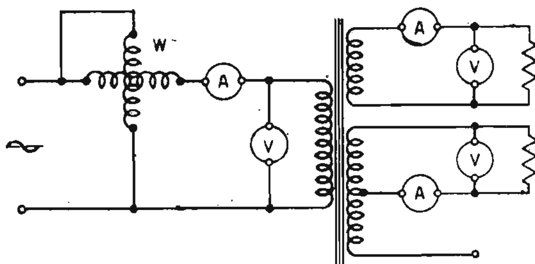


Fig. 39 - Inserzione degli strumenti per la misura del rendimento e del cos φ'.

non su esemplari di serie, è quella del rendimento e del fattore di potenza. Per poterla condurre è necessario disporre di strumenti la cui precisione sia non inferiore all'1 % ed abbiano portate tali da effettuare le misure almeno a 2/3 scala, altrimenti l'approssimazione sarebbe tale che i risultati non avrebbero alcun senso pratico e tanto varrebbe non avere eseguita la misura. La disposizione degli strumenti sul primario è quella indicata dalla fig. 39. Il complesso dei secondari è caricato in misura normale e l'entità del carico è misurata con voltmetro e ampermetro su ciascun

$$\eta \% = \frac{W_s}{W_p} \qquad \text{(IV-3)}$$

rendimento del trasformatore,

e: $$\cos \varphi' = \frac{W_p}{V_p A_p} \qquad \text{(IV-4)}$$

fattore di potenza del trasformatore.

Il carico deve essere costituito da resistenze pure, altrimenti nelle relazioni soprariportate si dovrebbe tener conto del fattore di potenza del carico.

Prova di sovrariscaldamento.

E' questa un'altra prova da eseguire in sede sperimentale: si tratta di misurare il sopraelevamento della temperatura del trasformatore rispetto alla temperatura ambiente. La prova si esegue con il trasformatore caricato normalmente: regolate le correnti secondarie alla loro giusta entità con la tensione primaria al suo valore normale, è bene elevare quest'ultima del $5 \div 10$ % per tener conto di eventuali sovraccarichi. Il trasformatore va tenuto in queste condizioni per almeno due ore allo scopo di permettere ad esso di raggiungere un equilibrio termico stabile: trascorso il tempo stabilito si effettua la lettura della temperatura del trasformatore e quella dell'aria ambiente, ricavando il sopraelevamento di temperatura come differenza fra le due misure.

Durante la prova il trasformatore in esame dovrà naturalmente essere corredato di tutti quegli accessori, come calotte, cavallotti, premipacchi, ecc. che ne possano ostacolare il raffreddamento.

Lo scoglio maggiore in questo esperimento è rappresentato dalla pratica misura della temperatura del trasformatore, causa la difficoltà di sistemazione del termometro relativo (che dovrà avere una scala intorno ai 100°).

Anche a regime esistono delle differenze di temperatura fra rame e ferro e tra punto e punto di essi; è anzi certo che le temperature all'interno saranno maggiori di quelle esterne; ma non potendosi praticamente effettuare altre misure che all'esterno, specie se il trasformatore è chiuso in calotte, ci si limiterà a quest'ultima ricordando che essa è la minima fra tutte. Per un buon contatto del bulbo termometrico con il

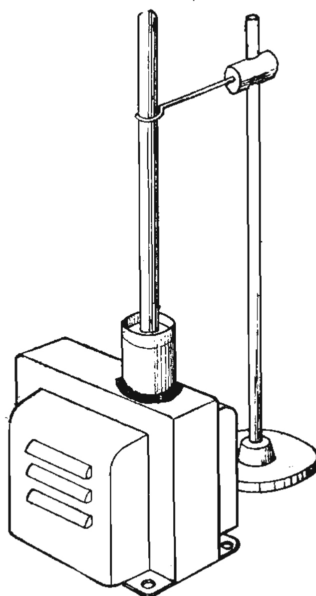


Fig. 40 - Misura del riscaldamento di un trasformatore.

pacco del trasformatore si potrà ricorrere ad una legatura; preferibile però è effettuare il contatto termico a mezzo di un pozzetto di mercurio così come indicato nella fig. 40. Un tubetto di vetro di opportuno diametro è fissato sopra il pacco con mastice che ne assicuri la stabilità e la tenuta al tempo stesso: il tubetto viene riempito di mercurio per un'altezza pari a quella del bulbo del termometro: quest'ultimo è poi infilato in esso e tenuto in posizione verticale da un apposito sostegno.

COLLAUDO DI PRODUZIONE

Generalitá

Delle prove di cui abbiamo parlato finora si è visto che alcune si riferiscono soltanto a sperimentali di progetto: quelle essenziali per il controllo della produzione in serie e in base alle quali si può constatare se il trasformatore sia accettabile o meno, si possono così ricapitolare:

— 1) prova di isolamento tra i vari avvolgimenti e tra questi ed il ferro;

— 2) misura delle tensioni primarie a vuoto;

— 3) misura della corrente a vuoto;

— 4) misura delle tensioni secondarie a carico;

— 5) misura della corrente primaria a carico.

Le cinque prove anzidette inquadrano completamente il funzionamento del trasformatore; dovrebbero essere eseguite senz'altro su ogni esemplare costruito perchè esso possa ritenersi sufficientemente collaudato; meglio se tra la terza e la quarta prova si interporrà un periodo di due ore di funzionamento del trasformatore sotto carico normale.

Perchè esse possano effettivamente essere eseguite su tutta la produzione è necessario che tutte le apparecchiature di prova siano predisposte in modo da facilitare al massimo il collegamento e rendere spedite le misure; in caso contrario si richiederà un tempo così lungo per il collaudo che il costruttore finirà per rinunciarvi a tutto scapito della bontà e regolarità della produzione.

Se il costruttore è orientato verso una produzione di massa di trasformatori di un determinato tipo, ad esempio il tipo radio, di cui principalmente ci occupiamo, gli converrà senz'altro progettare e costruire un banco prova adatto per il collaudo in serie della produzione seguendo le caratteristiche dei trasformatori da provare.

Banchi di prova.

Senza voler entrare in dettagli precisi di costruzione, che ognuno potrà determinare secondo le proprie disponibilità ed orientamenti costruttivi, esaminerò qui di seguito le caratteristiche principali a cui dovranno conformarsi in genere i banchi di prova per il collaudo dei trasformatori tipo radio.

La successione delle prove è quella precedentemente indicata: al primo esito negativo si scarterà il trasformatore annotando su di esso le cause dello scarto.

Per quanto riguarda la strumenteria necessaria valgano le note seguenti:

Prova di isolamento: come rivelatore di isolamento difettoso si potrà usare semplicemente una lampadina, come precedentemente indicato nel relativo paragrafo; per una maggiore precisione di misura è però preferibile uno strumento di misura in c.a. inserito fra i punti in prova, previa interposizione di una forte resistenza in serie al circuito del trasformatore di misura. La disposizione è illustrata dalla fig. 41. Il consumo del voltmetro anzidetto deve però essere molto piccolo, in modo da non rendere poco sensibile il dispositivo. Uno strumento da 1 mA con raddrizzatore, della portata di 2000 V potrà andare benissimo; la sua precisione non ha alcuna importanza trattandosi di rilevare soltanto, in caso di isolamento difettoso, una deflessione indietro dell'indice o addirittura il ritorno a zero nel caso di cortocircuito franco.

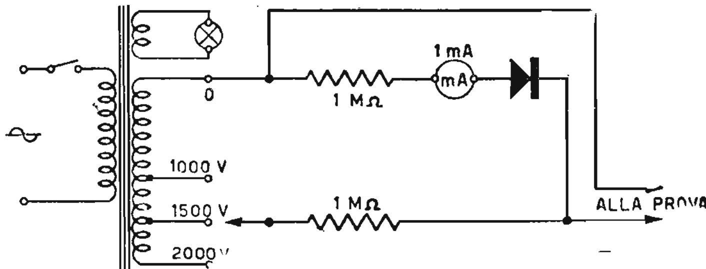


Fig. 41 - Altra apparecchiatura per la misura dell'isolamento.

Misure di tensione e corrente primaria: un qualsiasi strumento a c.a. di scala adatta potrà servire per la

misura della tensione primaria. E' sufficiente che lo strumento sia esattamente tarato sulla tensione corrispondente alla rete di alimentazione disponibile nel posto di collaudo.

Lo strumento indicatore di corrente primaria, di cui già si è parlato, dovrà avere almeno due scale: una per la corrente a vuoto ed una per la corrente a carico. Questo strumento, come quelli sui secondari, è bene abbia due indici mobili di riferimento per l'indicazione delle correnti normali.

Misura delle tensioni e correnti secondarie: per ogni secondario occorrono un amperometro ed un voltmetro di opportuna scala: anche qui indici mobili di riferimento faciliteranno molto il controllo. In complesso, prevedendo ad esempio tre possibili secondari occorreranno almeno nove strumenti; se i secondari previsti fossero di più, per non aumentare troppo il costo e la complicazione dell'apparecchiatura converrebbe usare, per i secondari a bassa tensione, un solo voltmetro commutato abolendo magari gli ampermetri e facendo affidamento sui resistori di carico che verrebbero regolati in partenza, a seconda del tipo di trasformatori da provare, con un unico ampermetro portatile inserito succ-successivamente sui vari circuiti B.T.

Costituzione dei carichi secondari.

Il carico complessivo da applicare ai secondari del trasformatore in collaudo potrà essere costituito, come già si è detto, sia dal carico reale sul quale il trasformatore dovrà lavorare (circuito rettificatore completo, ad es.) oppure semplicemente da resistori fissi o regolabili capaci di sopportare la corrente che in essi dovrà circolare.

La scelta di un sistema o dell'altro è di schietta pertinenza del progettista, cui le particolarità dell'indirizzo costruttivo daranno suggerimenti migliori di quelli che non possa dare l'autore.

A solo titolo di esempio citerò due casi tipici:

1) Una fabbrica di radio, che costruisca in sede i trasformatori per i suoi apparecchi, impostando la costruzione di qualche migliaio o più di pezzi, avrà certamente ogni convenienza nel costruire per il loro collaudo un fac-simile del circuito di alimentazione dell'apparecchio che possa servire da carico per i trasformatori suddetti.

2) Un costruttore per conto terzi, la cui produzione sia in ogni momento variabile e di piccola serie, avrà in-

vece la convenienza di formare il suo carico con resistori largamente variabili in modo da poterli adattare in ogni caso od almeno nella generalità di essi.

Come si vede, sono le particolari circostanze che consigliano in merito: l'unica osservazione che potremo fare al riguardo è che i carichi resistivi assorbono corrente immediatamente all'atto della loro inserzione, mentre i carichi valvolari esigono un certo tempo per la loro messa a regime.

E' per questo che, occorrendo guadagnare tempo nelle prove, si fa uso generalmente di resistori sui secondari B.T. mentre i secondari A.T. destinati al raddrizzamento potranno essere applicati su circuiti rettificatori, le cui raddrizzatrici siano però alimentate, per il filamento, da altro trasformatore permanentemente inserito.

Distribuzione e suddivisione degli elementi del banco prova.

In questa materia si possono dare più precise indicazioni e consigli: qui difatti non si tratta di discriminare in base all'entità della produzione, essendo il problema generale.

Seguendo i dati della personale pratica ed esperienza consiglio di suddividere la prova dei trasformatori in tre parti distinte, separando materialmente anche le relative apparecchiature, nel modo seguente:

1) prova dell'isolamento;
2) prova della corrente a vuoto e delle tensioni primarie e secondarie a vuoto;
3) Prova sotto carico.

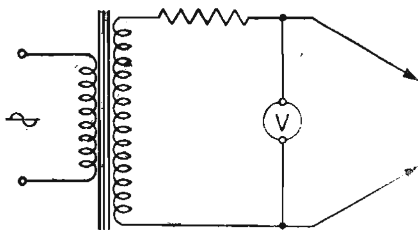


Fig. 42 - Trasformatore con voltmetro per la prova dell'isolamento in c.a.

L'ultima di queste potrà anche essere eventualmente omessa o eseguita su piccole percentuali della produzione.

La prima prova verrà eseguita non appena terminato il montaggio definitivo del trasformatore (eseguirla prima non avrebbe significato); la seconda prima della consegna a magazzino o al cliente; della terza abbiamo detto.

Il dispositivo da adoperarsi per la prova di isolamento potrà essere del tipo precedentemente illustrato o come quello il cui schema è riportato in fig. 42. In quest'ultimo caso si ha il vantaggio di avere sempre sot-

t'occhio il valore esatto della tensione di prova ma si esige che il collaudatore guardi continuamente lo strumento: il che per taluni è scomodo, tanto che talvolta l'uso di un semplice trasformatore ad alta tensione, senza resistenza di protezione e lampadina spia può essere più pratico, specie per un operatore ben addestrato.

Il secondo gruppo di prove verrà effettuato con mezzi più o meno semplici a seconda del numero di trasformatori da controllare. Se la quantità in collaudo è forte, per non ingenerare stanchezza e conseguente facilità di errori nell'operatore, converrà predisporre un'adatta apparecchiatura atta a facilitare le letture. Questo dispositivo è illustrato nella fig. 43 cui rimandiamo il lettore.

La pratica delle prove è la seguente: il trasformatore viene collegato direttamente ai morsetti previsti sull'apparecchiatura: un opportuno autotrasformatore invia al primario successivamente, mediante manovra dell'inseritore *A*, tensioni uguali a quelle nominali delle varie prese; la costante indicazione del voltmetro *B* segnalerà l'esattezza dell'avvolgimento primario (o della colorazione o del collegamento dei terminali); sulla presa in cui il voltmetro *B* è inserito si effettuerà quindi la lettura della corrente a vuoto.

Si farà in seguito, lasciando l'inseritore primario in una posizione qualsiasi, la lettura delle tensioni secondarie. Il commutatore *F* collega successivamente i vari secondari al voltmetro *D* commutando in pari tempo le resistenze variabili semifisse *E*, che ne variano la portata. Con questo accorgimento è possibile, non solo adoperare un solo strumento ma anche aggiustare preventivamente le resistenze *E* in modo che, a tensioni regolari, corrisponda una stessa indicazione del voltmetro *D* per qualunque dei secondari. L'operazione di messa a punto viene effettuata prima di iniziare il collaudo, dall'operatore o da un tecnico, a mezzo di un voltmetro di controllo inserito sui morsetti all'uopo previsti.

Va da sè che il voltmetro *D* non ha scala graduata, ma un semplice segno di riferimento, eventualmente di lar-

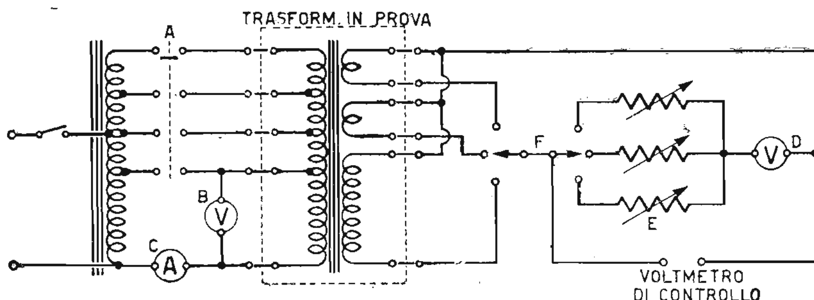


Fig. 43 - Apparecchiatura per la prova completa di un trasformatore.

ghezza tale da coprire lo scarto di tolleranza ammesso. Anche il voltmetro *B* potrà essere dello stesso tipo, mentre l'ampermetro *C* sarà completamente graduato con eventuale indice mobile atto a segnare il valore della corrente normale. Le operazioni di controllo risultano facili e semplici, con vantaggio dell'economia e della sicurezza. Per la prova a carico non occorrono speciali indicazioni, tanto più che, come si è detto, il dispositivo di prova può assumere forme diverse.

Parte V

V A R I E

AUTOTRASFORMATORI

Generalità.

Nella copiosa letteratura pratica sui trasformatori radio, gli autotrasformatori hanno sempre avuto un ruolo di paría: qualche breve accenno, una citazione di sfuggita, o addirittura silenzio completo.

Eppure l'autotrasformatore è, nella pratica radio, largamente usato, più largamente almeno di quanto si creda: basterebbe citare, a questo proposito, oltre ai ben noti autotrasformatori universali di adattamento, gli autotrasformatori di alimentazione, tanto diffusisi negli ultimi tempi negli apparecchi radio economici o di piccolo ingombro e gli elevatori di tensione per i periodi di emergenza.

Persino quelli che con gli autotrasformatori non sembrano avere assolutamente nulla a che vedere, e cioè i normali trasformatori di alimentazione, compiono talvolta questo ufficio; vedansi infatti i radiofonografi in cui assai spesso il motorino fonografico viene alimentato a tensione costante facendo funzionare il primario del trasformatore di alimentazione appunto come autotrasformatore di linea.

Trasformatori equivalenti e corrispondenti.

Definiremo un autotrasformatore ed il suo modo di funzionare dicendo che esso è ed agisce come un trasformatore normale, in cui però la corrente secondaria (quella cioè assorbita dal carico) circola nell'avvolgimento insieme con la corrente primaria (corrente assorbita dalla linea di alimentazione) anzichè esserne elettricamente indipendente come in un comune trasformatore.

Questa particolare situazione crea

dei vantaggi e degli svantaggi, nonchè una certa complicazione concettuale nel calcolo; chiariremo però subito come un autotrasformatore qualsiasi possa essere ricondotto, sia per la sua rappresentazione che per il conteggio dei dati, ad un normale trasformatore ad esso equivalente.

A questo riguardo potremo vedere la cosa secondo due differenti aspetti, sostanzialmente equivalenti: la fig. 44 li rappresenta, insieme con lo schema dell'autotrasformatore risultante.

In *A* è un autotrasformatore a due prese: una corrispondente alla tensione V_a ed una alla tensione V_b. Per il momento supporremo essere la tensione V_b quella di alimentazione (o di entrata) e V_a quella di erogazione (o di uscita).

In *B* abbiamo un trasformatore di

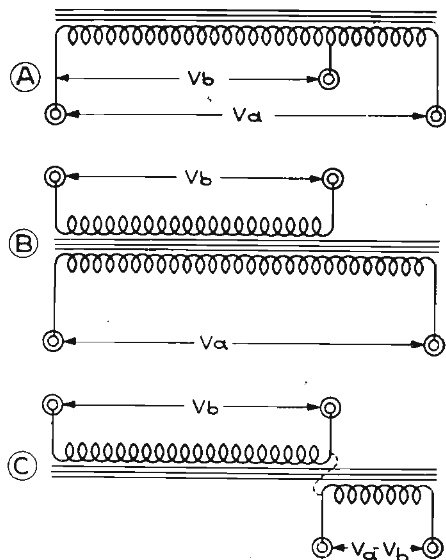


Fig. 44 - Schema di un autotrasformatore e dei trasformatori equivalente e corrispondente.

caratteristiche corrispondenti in cui V_a e V_b risultano da due avvolgimenti separati: chiameremo questo trasformatore « trasformatore corrispondente » in quanto esso assolve, sotto altra forma, al medesimo scopo al quale serve l'autotrasformatore *A*. La conversione dell'uno nell'altro si otterrebbe partendo dal trasformatore *B* e immaginando di compenetrare, spira per spira, l'avvolgimento primario con il secondario.

In *C* è invece rappresentato un trasformatore, che chiameremo « trasformatore equivalente », in cui ad un primario per la tensione V_b fa riscontro un secondario per la tensione $V_a - V_b$ e dal quale, mediante l'esecuzione esterna del collegamento tratteggiato in figura, si passa ancora all'autotrasformatore *A*.

La differenza fra i due modi di immaginare il passaggio da un trasformatore ad un autotrasformatore risiede nel fatto che il caso *B* risponde ad un criterio astratto, mentre il caso *C* rappresenta una soluzione reale in quanto, se noi costruissimo effettivamente quel trasformatore, il collegamento indicato tra primario e secondario ci porterebbe senz'altro ad ottenere l'autotrasformatore desiderato.

Per quanto riguarda il calcolo, come vedremo in seguito, il considerare l'una o l'altra delle due artificiose rappresentazioni cui abbiamo fatto ricorso non porta ad alcuna differenza: faremo quindi riferimento all'una o all'altra indifferentemente a seconda che l'argomento da trattare si presti ad essere più facilmente svolto con una di esse.

Potenza passante e potenza di trasformazione.

Quando si parla di potenza di un autotrasformatore si intende generalmente indicare con essa il prodotto della tensione secondaria per la corrente che, a questa tensione, si può ricavare senza che esso riscaldi oltre i limiti fissati; tale potenza è, naturalmente, espressa in VA e noi la chiameremo, nel corso di questo capitolo, « potenza passante » per distinguerla dalla « potenza di trasformazione » che, come si vedrà, è di entità diversa dalla precedente.

Consideriamo infatti nuovamente le figg. 44 B e 44 C: 44 B rappresenta un trasformatore avente la stessa potenza commerciale dell'autotrasformatore *A*, mentre 44 C è un trasformatore che possiede la stessa potenza di trasformazione: come si vede, la differenza sta nel fatto che con il trasformatore *B* noi dobbiamo trasformare tutta la potenza $V_a \cdot I_a$ mentre nel caso *C* la trasformazione è limitata unicamente alla potenza $(V_a - V_b) \cdot I_a$, ovviamente minore della precedente.

E poichè si è visto che l'autotrasformatore A equivale, non solo concettualmente, ma materialmente, al trasformatore *C*, potremo senz'altro scrivere, chiamando P_t e P_p la potenza trasformata e quella passante:

$$\frac{P_t}{P_p} = \frac{(V_a - V_b) \cdot I_a}{V_a \cdot I_a} =$$

$$= \frac{V_a - V_b}{V_a} \qquad \text{(V-1)}$$

da cui:

$$P_t = P_p \frac{V_a - V_b}{V_a} \qquad \text{(V-2)}$$

la quale, in parole, ci dice che:

« La potenza di trasformazione di un autotrasformatore è pari alla potenza passante moltiplicata per un rapporto, sempre minore di 1, eguale al quoziente dello scarto fra la tensione più alta e quella più bassa, diviso per la tensione più elevata. »

Questo semplice ragionamento, eseguito per il caso in cui si è supposto essere V_a la tensione secondaria e V_b quella primaria, ha ovviamente valore anche quando si consideri il funzionamento a rovescio e cioè con V_a come tensione primaria: le formule non mutano se continueremo a considerare per V_a il valore più elevato di tensione e per V_b quello più basso.

Come conseguenza si ha che l'uso di un autotrasformatore al posto di un trasformatore normale riesce tanto più conveniente quanto più lo scarto percentuale fra le due tensioni di entrata e di uscita è piccolo o, il che è lo stesso, quanto più il rapporto fra le due tensioni anzidette si avvicina all'unità.

Naturalmente, la possibilità di usa-

re un autotrasformatore è legata al fatto di poter tollerare che il carico o i carichi secondari siano elettricamente collegati con la rete di alimentazione; se ciò non sussiste il criterio economico perde ogni valore e la soluzione con trasformatore si impone.

Correnti negli avvolgimenti di un autotrasformatore.

Per determinare quale sia l'entità delle correnti circolanti in un autotrasformatore ci converrà questa volta riferirci al trasformatore corrispondente di fig. 44 B.

Ne riportiamo nuovamente lo schema in fig. 45 A: in 45 B quello dell'autotrasformatore ottenuto mediante ideale compenetrazione dei due avvolgimenti l'uno nell'altro.

Supponendo il carico, rappresentato per semplicità da una resistenza, applicato all'avvolgimento di tensione V_a, esso farà circolare in quest'ultimo una corrente I_a; corrispondentemente viene richiamata nel primario una corrente I_b che, se per il momento prescindiamo dalle perdite e dalla corrente magnetizzante, avrà il valore:

$$I_b = I_a \frac{V_a}{V_b} \qquad \text{(V-3)}$$

Se ora, con una immaginaria tenaglia, facciamo penetrare l'un avvolgimento nell'altro constateremo che nel tratto divenuto comune circoleranno assieme le due correnti I_a ed I_b, dando evidentemente luogo ad una corrente risultante.

Ma le due correnti suddette risultano opposte di fase perchè l'una è magneticamente indotta dall'altra e quindi il tratto BC sarà sottoposto ad una corrente eguale alla loro differenza:

$$I_{BC} = I_a - I_b = I_a - I_a \frac{V_a}{V_b} \qquad \text{(V-4)}$$

donde:

$$I_{BC} = I_a \left(1 - \frac{V_a}{V_b}\right) \qquad \text{(V-5)}$$

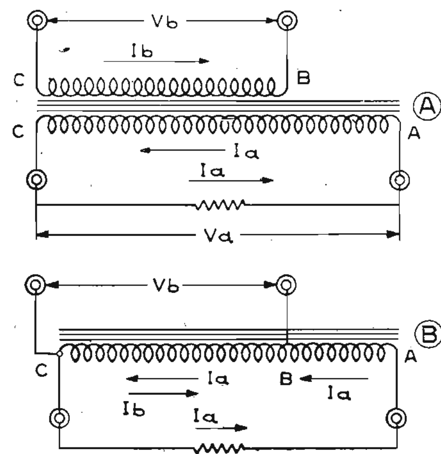


Fig. 45 - Correnti in un autotrasformatore e nel trasformatore corrispondente.

oppure, notando che $V_a \cdot I_a$ rappresenta la potenza commerciale P_c:

$$I_{BC} = I_a - \frac{P_c}{V_b} \qquad \text{(V-6)}$$

Naturalmente, la corrente I_{BC} risulterà positiva o negativa a seconda che V_a sia minore o maggiore di V_b; ma questo non ha importanza dato che a noi interessa soltanto conoscerne il valore assoluto in base al quale calcolare il dimensionamento del filo nel tratto considerato.

Se l'avvolgimento ha più prese e ad esse sono collegati altrettanti carichi secondari, il calcolo potrà essere effettuato nel senso di conteggiare separatamente le correnti risultanti relative ad ogni carico, effettuandone quindi la somma algebrica.

In questa eventualità occorrerà però che nelle espressioni del tipo (V-5) o (V-6) si tenga conto anche del segno.

Potenza virtuale di un autotrasformatore.

Dalle considerazioni svolte precedentemente si desume facilmente che la potenza virtuale di un autotrasformatore altro non è che quella del trasformatore equivalente ed è pertanto da calcolarsi con i noti sistemi.

Caduta di tensione negli autotrasformatori.

La caduta di tensione in un autotrasformatore è piccola in confronto di quella che si avrebbe con un trasformatore normale; e tanto più piccola quanto più lo scarto di tensione percentuale fra entrata ed uscita sarà ridotto.

Il ragionamento che si può fare è infatti analogo a quello seguito a proposito della potenza passante e quella di trasformazione: la caduta di tensione, diremo così, « di targa » dell'autotrasformatore è infatti definita dall'espressione:

$$\Delta V \,\% = 100 \, \frac{V_a' - V_a''}{V_a'} \qquad \text{(V-7)}$$

ove V_a' e V_a'' sono rispettivamente le

tensioni secondarie a vuoto e a carico. Ma noi possiamo considerare la tensione V_a' composta di due termini: il primo la tensione di alimentazione V_b che supponiamo, come è logico, non soggetta a variazioni con il carico; il secondo la parte trasformata $V_a' - V_b$ che supporremo soggetta ad una caduta di tensione $\triangle V'\%$ calcolabile con i soliti metodi riferiti al trasformatore equivalente.

Pertanto, la tensione secondaria a vuoto $V_a' = V_b + (V_a' - V_b)$ assumerà a carico il valore $V_a'' = V_b + (V_a' - V_b) - \triangle V'\% (V_a' - V_b)/100$.

Introducendo nella (V-7), al posto di V_a' e V_a'' i valori ora determinati si ottiene facilmente:

$$\triangle V\,\% = \triangle V'\% \frac{V_a' - V_b}{V_a'} \qquad \text{(V-8)}$$

espressione in tutto analoga alla (V-2) dalla quale si può dedurre quanto già prima enunciato: essere cioè la caduta di tensione effettiva proporzionale alla caduta di tensione del trasformatore equivalente secondo un rapporto tanto più piccolo quanto più il rapporto V_b/V_a' si avvicina all'unità (1).

Naturalmente si potrà eseguire una compensazione della caduta di tensione: questa viene generalmente eseguita sulla sezione secondaria dell'autotrasformatore avvolgendo spire in più o in meno a seconda che si tratti di un autotrasformatore elevatore o riduttore.

Funzionamento degli autotrasformatori nei due sensi.

Nulla vieta di far funzionare lo stesso autotrasformatore a volte come elevatore ed a volte come riduttore: però la conclusione tratta alla fine del precedente paragrafo ci avverte che i due rapporti di trasformazione che si otterranno non potranno essere esattamente reciproci, dato che la caduta di tensione li modifica diversamente a seconda che la trasformazione avvenga in salita o in discesa.

Se, ad esempio, un autotrasformatore è stato costruito per un rapporto 125/160 V compensando la caduta di tensione effettiva, che supporremo del 3 % con un aumento delle spire della sezione 125-160 in modo che la tensione a vuoto risulti di 160 / 1 — — 0,03 = 165 V, nel funzionamento

(1) In pratica è noto il valore di V_a'' (tensione a carico) e non il valore di V_a'. La sostituzione dell'uno all'altro nella formula (V-8) è autorizzata dalla piccola differenza esistente fra i due valori e dall'essere il termine V_a' anche al denominatore.

a rovescio e cioè da 160 a 125 V esso fornirà una tensione di uscita inferiore a quella stabilita di ca. il 6 % (3 % per l'aumento spire e 3 % per la caduta di tensione); la tensione a carico sarà quindi, anzichè 125, 118 V all'incirca.

Per cui, se un autotrasformatore è destinato a funzionare saltuariamente in salita e in discesa, la miglior cosa da farsi è di calcolarlo senza tener conto delle cadute di tensione: in tal caso le tensioni di uscita risulteranno tutte in difetto di una certa percentuale, qualunque sia il senso di impiego.

Rendimento degli autotrasformatori.

Ritengo inutile rinnovare per la terza volta il ragionamento fatto per la potenza e la caduta di tensione; il rendimento apparentemente elevato degli autotrasformatori deriva ancora una volta dalla loro caratteristica sostanziale: essere cioè dei trasformatori di una parte soltanto della potenza riscontrabile al secondario.

Va da sè che le perdite, essendo proporzionali alla sola parte trasformata, incidono in misura lieve sul totale della potenza secondaria, ed anche questa volta tanto meno quanto più il rapporto effettivo di trasformazione si approssima ad uno.

In un autotrasformatore che debba ridurre una tensione da 200 a 150 V soltanto una quarta parte della potenza occorrente passerà effettivamente attraverso l'avvolgimento e il rendimento percentuale, che è sempre riferito alla potenza assorbita dal carico, risulterà maggiore di quello di trasformazione secondo un rapporto di quattro.

Se nel nostro caso la trasformazione si effettuasse con un rendimento dell'80 % ciò significa che il 20 % della potenza trasformata si disperde in calore, ma questo 20 % di perdite è relativo soltanto alla quarta parte della potenza secondaria onde ne risulta che le perdite apparenti riferite a quest'ultima risulteranno soltanto del 5 % con un rendimento nominale del 95 %.

Analogamente potrebbe dirsi per il fattore di potenza che negli autotrasformatori risulta migliore che nei trasformatori di potenza corrispondente.

Effettivo valore delle correnti tenendo conto delle perdite e della corrente magnetizzante.

Finora ci si è valsi, per il calcolo delle correnti, della supposizione che potesse sussistere la relazione $V_a \cdot I_a = V_b \cdot V_b$, ossia che il rendimento fosse eguale a 1 e che non esistesse corrente magnetizzante.

Questo artificio di calcolo non porta evidentemente che a risultati approssimati e tanto più approssimati quanto più è piccola la potenza di trasformazione alla quale sono legate le dimensioni geometriche dell'autotrasformatore, essendo noto che il rendimento, a parità di altre condizioni, decresce con il diminuire delle dimensioni geometriche.

Pertanto, se non potremo, come quasi sempre avviene, trascurare completamente i fattori anzidetti, dovremo modificare i nostri calcoli per tenerne conto. E vediamo come.

Le perdite, sia quelle nel rame che quelle nel ferro, corrispondono ad un assorbimento di potenza reale: tutto avviene insomma come se, ad un trasformatore ideale privo di perdite noi aggiungessimo un secondario con un carico eguale alla loro somma complessiva.

Per il nostro scopo però, sarà sufficiente pensare che è appunto alle perdite nel rame che è dovuta la caduta di tensione e che questa è a quelle proporzionale; per cui se nel calcolo noi considereremo le varie notazioni V_a, V_b ecc., rappresentative, non delle effettive tensioni, ma delle f.e.m. relative ai vari tratti, avremo già automaticamente tenuto conto delle perdite poichè nel calcolo le correnti ne risulteranno corrispondentemente variate. Le perdite nel ferro possono essere in genere trascurate.

Naturalmente le f.e.m. secondarie saranno date dalla tensione secondaria aumentata della caduta di tensione, mentre il contrario avverrà per le f.e.m. primarie. Nella pratica, come già si è accennato, conviene supporre tutta la caduta di tensione concentrata negli avvolgimenti secondari ed effettuare quindi solo su di questi la variazione accennata.

Superato così, con questo artificio di calcolo, la questione delle perdite, resta a considerare l'influenza della presenza della corrente magnetizzante la quale sarà tanto più importante quanto maggiore sarà stato il valore assunto nel calcolo per l'induzione.

Si noti poi che questa corrente risulta pressapoco in quadratura tanto con la corrente secondaria che con quella primaria, per cui la sua composizione con esse va effettuata geometricamente, per via grafica o analitica.

Il valore assoluto della corrente

magnetizzante dipende soltanto dall'induzione, dimensioni e qualità dei lamierini, frequenza e traferro. Può essere pertanto calcolato indipendentemente dalle correnti principali quando si conoscano tutti i fattori suaccennati.

Il calcolo però riesce difficilmente preciso per l'imperfetta conoscenza della qualità del ferro; per cui questa imprecisione ci autorizza a semplificare il calcolo valutando la corrente magnetizzante come percentuale della corrente primaria a carico scrivendo:

$$I_m = I_1 \operatorname{tang} \varphi' = \frac{P_t}{V_1} \operatorname{tang} \varphi' \quad \text{(V-9)}$$

in cui φ' rappresenta l'angolo di sfafasamento a carico proprio dell'autotrasformatore; tang φ', per le costruzioni medie con induzione intorno alle 10 000 linee/cm^2 può essere valutato fra 0,55 e 0,4 (i valori maggiori per le induzioni più elevate). V_1 è la tensione di alimentazione (2).

Esempio pratico.

Ed ora, poichè nulla val meglio di un esempio a chiarire le idee, applichiamo le nozioni acquisite al calcolo di due casi ben definiti, scelti fra quelli più comuni nella pratica.

Come primo caso sceglieremo quello di un autotrasformatore universale, per 250 VA di erogazione, tensioni come indicato in fig. 46.

Per il dimensionamento ci riferiremo alla condizione di lavoro più gravosa, quella cioè in cui le prese utilizzate siano quelle corrispondenti a 110 e 220 V. Partendo da questo concetto la (V-2) ci fornisce:

$$P_t = P_c \frac{220 - 110}{220} =$$

$$= 250 \frac{220}{220 - 110} = 125 \text{ VA}$$

Grosso modo l'autotrasformatore avrà quindi le dimensioni di un trasformatore da 125 VA ed è in base a questo dato che, seguendo le formule note,

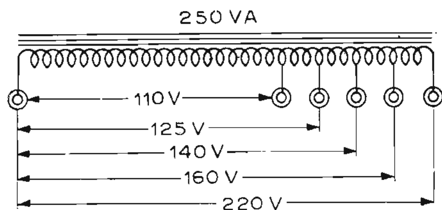


Fig. 46 - Schema di un autotrasformatore a tensioni multiple (universale).

(2) I_1 rappresenta il valore della parte reale della corrente primaria che competerebbe al trasformatore equivalente. Effettivamente si dovrebbe scrivere: $I_1 = P_t / \eta \, . \, V_1$ essendo η il rendimento. Per semplicità lo si è trascurato, atteso il fatto che anche il valore di tangente φ' è soggetto a valutazione imprecisa e grossolana.

predisporremo la sezione del nucleo ed il tipo di lamierino. Ma non è compito di questa trattazione occuparci di ciò; quello che ci interessa è invece il determinare l'entità delle correnti nelle varie sezioni.

I dati, riuniti nella tabella seguente, vengono calcolati con la formula (V-6) considerando tutte le possibili combinazioni due a due delle diverse prese previste.

Tenendo per il momento conto di un valore medio di tang $\varphi' = 0{,}5$ le correnti magnetizzanti relative alle prese successive da 110 a 220 sono rispettivamente: 0,57 - 0,50 - 0,45 - 0,39 - 0,28 (calcolate secondo la (V-9)). Dette correnti, come si è detto, risultando in quadratura con quelle principali, vanno con esse composte geometricamente secondo il teorema di Pitagora: per la sezione

Rapp. trasf.	125-110	140-125	160-140	220-160	140-110	
$I_a = P_c/V_a$	2,0	1,78	1,56	1,14	1,78	Amp.
$I_b = P_c/V_b$	2,28	2,0	1,78	1,56	2,28	»
Corr. risult.	0,28	0,22	0,22	0,42	0,50	»
Rapp. trasf.	160-125	220-140	160-110	220-125	220-110	
$I_a = P_c/V_a$	1,56	1,14	1,56	1,14	1,14	Amp.
$I_b = P_c/V_b$	2,0	1,78	2,28	2,0	2,28	»
Corr. risult.	0,44	0,64	0,72	0,86	1,14	»

I valori delle correnti risultanti nelle varie sezioni, nei diversi casi considerati, sono riuniti a loro volta nella tabella della fig. 47 che, per la sua particolare disposizione, si presta ad una inquadratura chiara e visiva della situazione.

Ai piedi della tabella sono indicate le correnti massime che in ciascuna sezione possono verificarsi. Della caduta di tensione, come già avemmo occasione di dire, non ci dovremo preoccupare se non per un controllo dei risultati pratici in funzionamento.

Resta da calcolare invece l'aumento da apportarsi alle correnti principali per tener conto della corrente magnetizzante, la quale, fra l'altro, sarà diversa a seconda della presa primaria utilizzata.

0 — 110 avremo ad esempio:

$$I = \sqrt{1{,}14^2 + 0{,}57^2} = 1{,}28 \text{ Amp.}$$

Le correnti finali così calcolate relative a tutte le prese dell'autotrasformatore sono pure elencate nella tabella citata.

Come si può constatare, l'aver tenuto conto anche di questo fattore non ha sostanzialmente modificato la situazione per cui, nella generalità dei casi, sarà sufficiente una leggera maggiorazione nella sezione del filo senza che si debba eseguire il conteggio preciso delle correnti effettive.

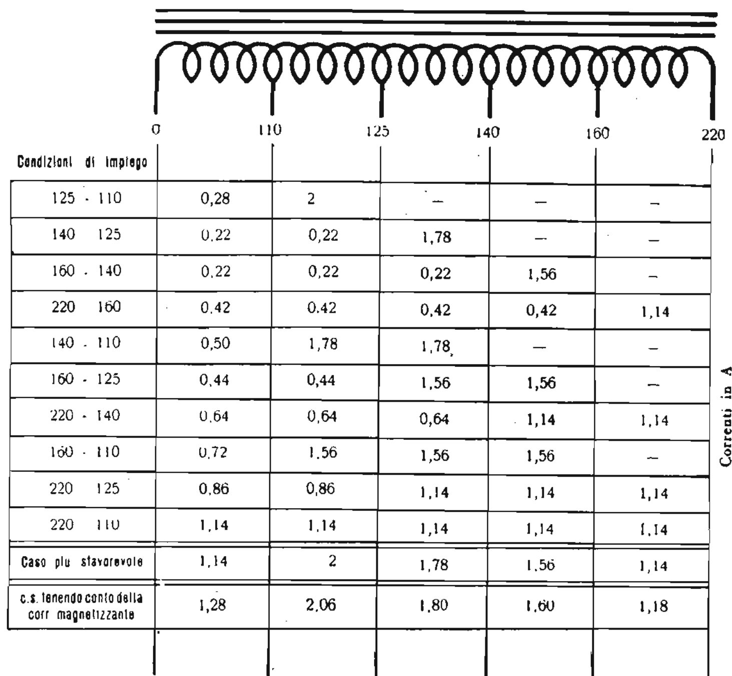
Ci sia permesso ora qualche osservazione a proposito appunto di questi autotrasformatori universali che

si possono considerare gli autotrasformatori per antonomasia:

La tabella di fig. 47 mostra chiaramente quale irregolarità nel valore delle correnti si riscontri nei diversi casi di impiego, conseguenza inevitabile di una soluzione universale e, conseguentemente, di compromesso. Le sezioni di filo diverse da usare nell'avvolgimento sarebbero almeno quattro, mentre, in un caso come questo, che corrisponde ad un tipo commerciale molto diffuso, vediamo i costruttori impiegare generalmente una sola sezione di filo dal principio alla fine.

Ciò non vuol dire che in una costruzione ben calcolata non si debba tener conto della diversità delle correnti probabili: ma l'artificio ha una qualche giustificazione nel fatto che le correnti più forti si riscontrano solo in brevi tratti dell'avvolgimento e si verificano contemporaneamente a correnti molto basse nel rimanente; per cui una compensazione del riscaldamento delle varie zone sussiste e la temperatura generale si mantiene in limiti tollerabili.

Conviene invece che nel calcolo si adotti una forte sezione di ferro (più grande di quella optimum per un trasformatore della stessa potenza di trasformazione) e ciò soprattutto per diminuire la caduta di tensione di cui, come abbiamo visto, non pos-



Condizioni di impiego	0 – 110	110 – 125	125 – 140	140 – 160	160 – 220
125 - 110	0,28	2	–	–	–
140 125	0,22	0,22	1,78	–	–
160 - 140	0,22	0,22	0,22	1,56	–
220 160	0.42	0.42	0,42	0,42	1,14
140 - 110	0,50	1,78	1,78	–	–
160 - 125	0,44	0,44	1,56	1,56	–
220 - 140	0,64	0,64	0,64	1,14	1,14
160 - 110	0,72	1,56	1,56	1,56	–
220 125	0,86	0,86	1,14	1,14	1,14
220 110	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14
Caso piu sfavorevole	1,14	2	1,78	1,56	1,14
c.s. tenendo conto della corr magnetizzante	1,28	2,06	1,80	1,60	1,18

Fig. 47 - Dimostrazione delle correnti nelle varie sezioni dell'autotrasf. di fig. 46.

siamo effettuare compensazione. Per la stessa ragione saranno da adottare preferibilmente nuclei a sezione quadrata. Altra ottima precauzione sarà quella di non esagerare nell'induzione magnetica di calcolo: si ricordi che spesso l'autotrasformatore potrà servire ad elevare la tensione in circostanze in cui ad un abbassamento di tensione corrisponde anche una diminuzione della frequenza; e questo potrebbe portare l'autotrasformatore a lavorare con correnti magnetizzanti pericolose.

Come cifra media per l'induzione consiglio di non superare il valore di 10 000 linee/cm^2; la frequenza di calcolo sarà naturalmente di 42 pe-

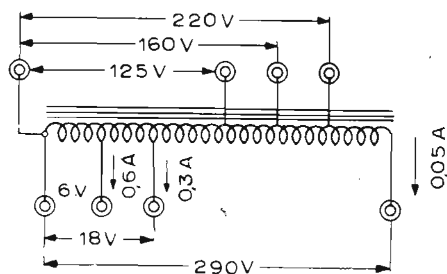


Fig. 48 - Schema di autotrasformatore per alimentazione apparecchi radio.

riodi/sec. come la più bassa riscontrabile ancora nelle reti di distribuzione italiane.

E vediamo ora il secondo esempio che si riferisce ad un autotrasformatore di alimentazione di ridottissime dimensioni, il cui schema e le cui caratteristiche sono rappresentati nella fig. 48.

Come nell'esempio precedente si procede inanzitutto al calcolo della potenza di trasformazione considerando una per volta le varie utilizzazioni indicate. Essendo le prese secondarie parte al disotto e parte al disopra di tutte le prese primarie, considereremo l'alimentazione a 220 V come la più sfavorevole per i secondari B.T. mentre per il secondario a 290 V questo sarà rappresentato dall'alimentazione a 125 V.

Avremo pertanto:

$$P_{t_1} = 6 \times 0{,}6 \frac{220-6}{220} = 3{,}6 \text{ VA}$$

$$P_{t_2} = 18 \times 0{,}3 \frac{220-18}{220} = 5 \text{ VA}$$

$$P_{t_3} = 290 \times 0{,}05 \frac{290-125}{290} = 8{,}25 \text{ VA}$$

$$P = P_{t_1} + P_{t_2} + P_{t_3} = 16{,}75 \text{ VA}$$

cifra in base alla quale ci orienteremo per il dimensionamento del circuito magnetico.

Prima di procedere avanti nel conteggio delle correnti dovremo occuparci della caduta di tensione, che in questo caso non possiamo assolutamente trascurare anche perchè, in un trasformatore di così ridotte dimensioni essa è sempre rilevante.

Il valore percentuale di questa caduta dipenderà dai parametri che sceglieremo per il calcolo (induzione e corr. specifica) e dalle dimensioni che daremo al nucleo magnetico, cose tutte di cui non ci vogliamo occupare: per dare però un senso reale al calcolo supporremo intanto, senza allontanarci molto dalla realtà, che la caduta di tensione nel trasformatore equivalente risulti del 16 %.

Si è visto precedentemente come tale valore non vada direttamente applicato ma modificato secondo la (V-8). In tal caso ci troviamo però di fronte ad una difficoltà: quale

valore assumeremo per V_a o V_b nella formula citata se le tensioni di alimentazione possono essere diverse? Non ci resta che scegliere una soluzione di compromesso assumendo nel calcolo un valore medio di queste tensioni: ad esempio quello di 160 V. Per cui avremo:

$$\triangle V_1 \% = 16 \left(\frac{160 - 6}{160}\right) = 15{,}4 \%$$

$$\triangle V_2 \% = 16 \left(\frac{160 - 18}{160}\right) = 14{,}2 \%$$

$$\triangle V_3 \% = 16 \left(\frac{290 - 160}{290}\right) = 7{,}2 \%$$

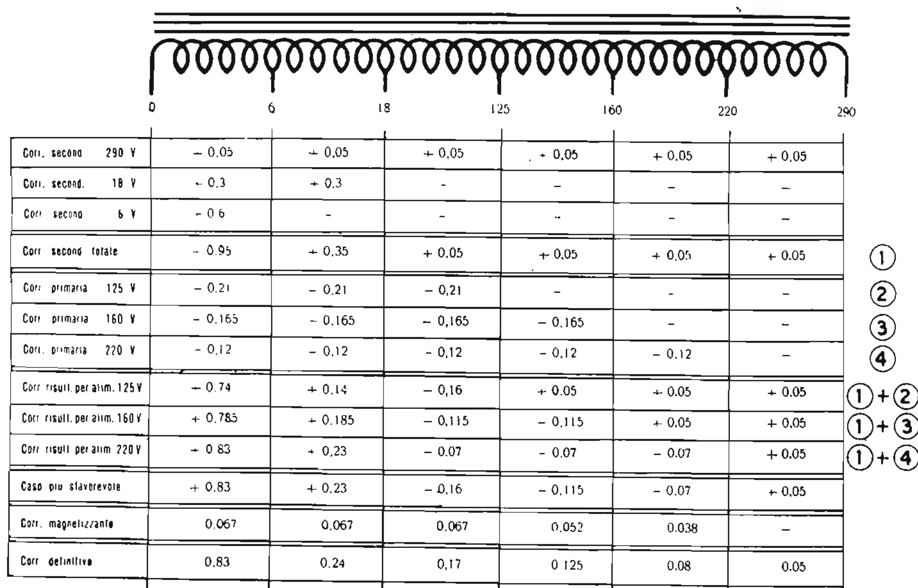
Dovremo dunque calcolare ad esempio la presa 290 per una tensione pari a:

$$E_{290} = \frac{290}{1 - 0{,}072} = 313 \text{ V}$$

e analogamente per le altre prese. Eseguendo le operazioni relative troviamo in definitiva che le prese del nostro autotrasformatore dovranno essere: 0 - 7,1 - 21 - 125 - 160 - 220 - 313 V.

In base a questi dati ed al numero di spire/volt risultante dal calcolo generale determineremo le spire dell'avvolgimento come in un qualsiasi trasformatore; vediamo ora invece quale sia il valore delle correnti che in questo avvolgimento circoleranno.

Per fare ciò dobbiamo inanzitutto



Corr. second 290 V	– 0,05	+ 0,05	+ 0,05	+ 0,05	+ 0,05	+ 0,05	
Corr. second. 18 V	– 0.3	+ 0.3	-	–	–	–	
Corr second 6 V	– 0 6	-	-	-	–	–	
Corr second totale	– 0.95	+ 0.35	+ 0.05	+ 0.05	+ 0.05	+ 0.05	(1)
Corr primaria 125 V	– 0.21	– 0.21	– 0,21	–	-	-	(2)
Corr primaria 160 V	– 0.165	– 0.165	– 0,165	– 0.165	–	–	(3)
Corr. primaria 220 V	– 0,12	– 0.12	– 0,12	– 0,12	– 0,12	–	(4)
Corr risult. per alim. 125 V	– 0.74	+ 0.14	– 0,16	+ 0.05	+ 0.05	+ 0.05	(1)+(2)
Corr risult. per alim. 160 V	+ 0.785	+ 0.185	– 0,115	– 0.115	+ 0.05	+ 0.05	(1)+(3)
Corr risult per alim 220 V	+ 0 83	+ 0,23	– 0.07	– 0.07	– 0.07	+ 0.05	(1)+(4)
Caso più sfavorevole	+ 0,83	+ 0.23	– 0,16	– 0.115	– 0.07	+ 0,05	
Corr. magnetizzante	0,067	0.067	0.067	0,052	0.038	–	
Corr definitiva	0,83	0.24	0,17	0 125	0.08	0.05	

Fig. 49 - Dimostrazione delle correnti nelle varie sezioni dell'autotrasf. di fig. 48.

calcolare la potenza effettiva (potenza passante) al secondario: questa risulta ovviamente di:

$$P_c = 7{,}1 \times 0{,}6 + 21 \times 0{,}3 + + 313 \times 0{,}05 = 26{,}15 \text{ VA.}$$

Conseguentemente le correnti primarie relative alle tre prese previste saranno nell'ordine:

$$I_{125} = 26{,}15 / 125 = 0{,}21 \text{ Amp.}$$
$$I_{160} = 26{,}15 / 160 = 0{,}165 \text{ Amp.}$$
$$I_{220} = 26{,}15 / 220 = 0{,}12 \text{ Amp.}$$

Istituiamo, come per l'esempio precedentente, una tabella riassuntiva (fig. 49) raggruppandovi le varie correnti, date o calcolate, avendo l'avvertenza di dare segno diverso alle correnti primarie ed a quelle secondarie. Per amore della precisione si è tenuto conto anche dell'aumento dovuto alla corrente magnetizzante, ma a questo proposito valgano le considerazioni svolte per l'esempio precedente.

Detta corrente magnetizzante, calcolata secondo la (V-9) e ancora per tang $\varphi' = 0{,}5$ risulta, a conti fatti, e relativamente alle tre prese di: 0,067 - 0,052 - 0,038 Amp.

Il procedimento per il calcolo delle correnti risultanti è sempre lo stesso e d'altronde facilmente seguibile sulla tabella stessa. I risultati definitivi sono quelli dell'ultima riga e ad essi ci riferiremo per il calcolo delle sezioni dei conduttori; il procedimento è forse un po' laborioso, ma non ha nulla di complicato o trascendentale: d'altronde è l'unico sistema per condurre in porto il calcolo senza errori e confusioni e con una soddisfacente precisione.

CAPITOLO DICIASETTESIMO

TRASFORMATORI SPECIALI

Generalità

Per completare il quadro generale ritengo opportuno fare cenno anche dei trasformatori speciali. Un cenno soltanto, non perchè la materia non meriti più ampio svolgimento, ma appunto perchè questo svolgimento potrebbe essere tanto lungo da formare argomento di una pubblicazione separata mentre l'argomento è di interesse limitato a particolari applicazioni che esulano dal nostro proposito.

Dei trasformatori speciali citerò le due più grandi categorie: i trasformatori di misura e i trasformatori autoregolatori. I primi vengono, come è noto, usati per ridurre correnti o tensioni ad entità misurabile con strumenti a corrente alternata di normale portata (ad es. 5 A — 100 V). Sono caratterizzati da un rapporto di trasformazione (costante di moltiplicazione) ben preciso e non differiscono dai normali trasformatori se non per le loro caratteristiche di alta qualità con riferimento alla caduta di tensione, corrente a vuoto, angolo di fase (per i tipi destinati a strumenti wattmetrici); il loro calcolo riguarda più che altro i costruttori di strumenti e non i costruttori radio o simili cui particolarmente si rivolge questa trattazione: non ne parleremo quindi ulteriormente.

I trasformatori autoregolatori, di corrente o di tensione, hanno comune caratteristica lo sfruttamento del fenomeno di saturazione del ferro costituente il circuito magnetico. In termini generali si può dire che un trasformatore autoregolatore è di regola costituito da due avvolgimenti (primario e secondario) non strettamente accoppiati come si cerca sempre di fare nei trasformatori normali, ma anzi messi in condizioni tali che, per particolari contingenze di funzionamento, il flusso provocato da uno di essi non si concateni totalmente con l'altro ma si disperda in parte nell'aria o in un circuito magnetico derivato nel quale nessun

avvolgimento è destinato a raccoglierlo.

Ricordando come sia appunto il valore del flusso a determinare le f.e.m. che nascono in un avvolgimento con esso concatenato, si comprende come questo modo di funzionare possa essere considerato come una variazione del rapporto di trasformazione che è invece invariabile nei casi normali.

Impostato così il principio di funzionamento ne viene di conseguenza che con il suo sfruttamento possiamo ottenere ad esempio che, ad un aumento della tensione primaria, corrisponda una variazione del rapporto di trasformazione in senso contrastante in modo che la tensione secondaria rimanga pressappoco costante: eguale ragionamento può farsi per le correnti.

Senza dilungarci ulteriormente in considerazioni teoriche, vediamo in fig. 50 alcune realizzazioni pratiche: il principio informatore è sempre lo stesso: sfruttare il fatto che, se il nucleo principale del trasformatore lavora già in regime di saturazione in condizioni normali, un aumento di corrente, e quindi di amperspire, in un avvolgimento aumenta di pochissimo il flusso nel circuito magnetico principale mentre potrà aumentarlo in un circuito magnetico derivato che sia lontano dalla saturazione, (ad es. provvisto di traferro). In tal modo l'aumento di forza magneto-motrice finisce per concentrarsi su una sezione di circuito inefficiente senza che il flusso principale ne resti apprezzabilmente influenzato. Si tratta, in altre parole, di creare un derivatore magnetico di flusso che incanali in sè l'eccedenza di flusso provocata da un aumento di f.m.m. in un avvolgimento. Questa condizione può essere realizzata ad esempio come in fig. 50 *A* o *B*: le due soluzioni sono pressappoco equivalenti, mentre altre disposizioni possono essere studiate in relazione anche alle possibilità costruttive.

Un calcolo teorico di tali trasformatori può essere istituito quando si conosca bene la caratteristica di saturazione del ferro, nel qual caso è facile, attraverso le normali formule relative alla riluttanza dei circuiti magnetici, prevedere la ripartizione dei flussi nella sezione saturata ed in quella non saturata; alcuni tentativi fatti scegliendo diversi valori per l'induzione-base permettono facilmente di determinare le migliori condizioni di funzionamento. Un'incognita del problema resta sempre la parte del flusso che si disperde nell'aria senza attraversare nessuno dei due bracci mentre d'altra parte non riesce sempre agevole realizzare esattamente il traferro calcolato per il braccio non saturo: di guisa che i risultati del calcolo vanno sempre confermati con una realizzazione pratica sperimentale in cui spire e traferro possano essere variate entro certi limiti. Non inopportuno è talvolta lasciare anche nelle costruzioni di serie la possibilità di variare il traferro per una taratura più accurata: la fig. 50 *C* presenta appunto una realizzazione costruttiva in cui il derivatore magnetico è completamente indipendente dal circuito principale e può essere ad esso accostato più o meno con interposizione di spessori (non magnetici) variabili in modo da ottenere una regolazione dell'effetto di

shuntaggio: naturalmente tutto l'assieme deve essere fortemente bloccato per evitare vibrazioni meccaniche.

Ovviamente il funzionamento in condizioni di forte saturazione implica forte assorbimento di correnti magnetizzanti, per cui le perdite nel rame ad essa dovute divengono rilevanti: elevate sono pure le perdite nel ferro dovute alla forte induzione, talchè il dimensionamento del trasformatore risulta maggiore che nei tipi normali, tenuto conto anche del derivatore magnetico che richiede uno spazio non sfruttabile per l'avvolgimento.

Altra caratteristica di questi trasformatori a ferro saturo è quella causata appunto dalla curvatura della caratteristica di magnetizzazione che provoca un raddrizzamento della forma d'onda con conseguente distorsione: ad una tensione primaria sinusoidale, ad esempio, fa riscontro sul secondario una tensione a forma sub-rettangolare che in taluni casi può essere indifferente o magari anche di giovamento, mentre in altri l'importanza di una forma d'onda pura può essere tale da far scartare questo tipo di regolazione.

Come si vede, non lievi sono i difetti insiti in questi trasformatori a ferro saturo: basso fattore di potenza, rendimento scarso, regolazione imperfetta, distorsione della forma d'onda; pur tuttavia la loro semplicità ed il loro funzionamento puramente statico costituiscono tali vantaggi nei confronti di altre regolazioni elettromeccaniche da farli preferire in molti casi: e le applicazioni sono molteplici.

Pur senza addentrarci soverchiamente nei particolari vogliamo citare due tipi di trasformatori a fuga magnetica che, per la loro enorme diffusione nel campo pratico, meritano una particolare citazione: i trasformatori per tubi luminescenti e gli auto-reattori per lampade fluorescenti.

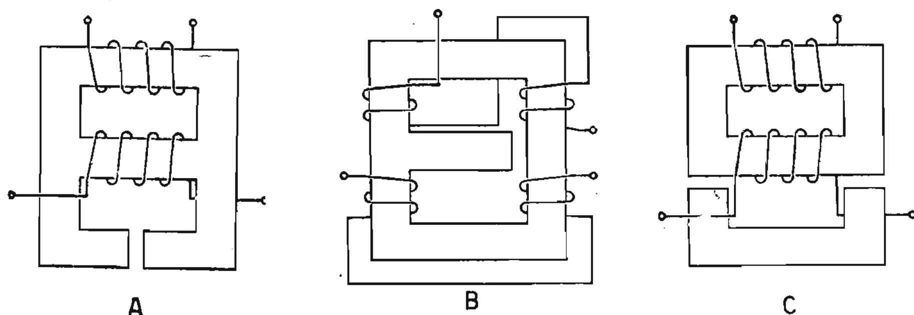


Fig. 50 - Vari schemi di realizzazione di trasformatori a fuga magnetica.

Tanto i tubi luminescenti che le lampade fluorescenti appartengono alla famiglia degli apparecchi di illuminazione utilizzanti la scarica elettrica in atmosfera gasosa: differiscono fra loro solo per la natura dei gas adoperati, per la pressione di essi e per le dimensioni sia di sezione

che di lunghezza. Il comportamento di questi mezzi di illuminazione nei riguardi del rapporto tensione-corrente presenta la particolarità propria a tutte le scariche nei gas rarefatti: ad un aumento della corrente corrisponde una diminuzione della caduta di tensione in modo che essi non possono essere alimentati con sorgenti di energia a bassa resistenza interna dato che in tal caso si avrebbe una rapida esaltazione della corrente con conseguente veloce deterioramento o distruzione. Perchè la corrente nel tubo di scarica si mantenga sufficientemente costante occorre che la sorgente di energia che alimenta la lampada sia estremamente elastica, reagendo ad un aumento della corrente con un conseguente abbassamento della tensione fornita, assai maggiore di quello che ci si potrebbe attendere dalla normale caduta di tensione di un comune trasformatore.

Non essendo possibile realizzare maggiori cadute di tensione mediante aumento della resistenza ohmica degli avvolgimenti, causa la forte dissipazione di calore che questo artificio comporterebbe, l'unico mezzo a disposizione resta l'aumento della reattanza del secondario: condizione che corrisponde appunto alla creazione di un flusso disperso che aumenti all'aumentare della corrente erogata. L'artificio che permette di realizzare questa dispersione del flusso è appunto quello della inserzione di uno shunt magnetico tra avvolgimento primario e secondario, come già avemmo occasione di illustrare più innanzi.

Dobbiamo solamente notare che, mentre per i tubi luminescenti si richiedono tensioni di alimentazione elevate (alcune migliaia di volt), per le lampade fluorescenti le tensioni rimangono nel campo dei valori di normale distribuzione.

Di conseguenza, mentre per i primi si costruiscono veri e propri trasformatori con primario e secondario nettamente separati, per le seconde si ricorre agli autotrasformatori o addirittura a delle semplici reattanze in serie sul circuito di rete.

Trasformatori per vibratori

Un tipo del tutto particolare di piccolo trasformatore, che merita di essere considerato per la sua attuale larga diffusione negli apparecchi radio ed altre apparecchiature elettroniche alimentate da batterie di accumulatori (autoradio e simili) è il trasformatore per vibratori.

Poichè questo tipo ha caratteristiche costruttive sue proprie che dipendono in larga parte dalla inusuale forma d'onda della corrente prodotta da un vibratore, occorre fare una breve premessa considerando appunto il particolare modo di funzionare di questo elemento.

Lo schema più semplice a cui si può ridurre l'accoppiamento di una batteria di accumulatori ad un trasformatore tramite un vibratore è

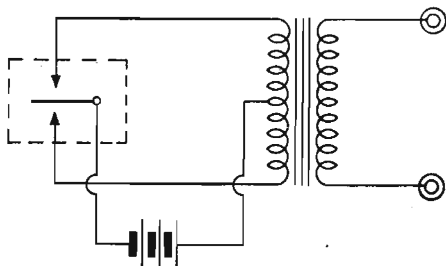


Fig. 51 - Trasformatore alimentato da un vibratore.

rappresentato dalla fig. 51 in cui è stato escluso, per semplicità, il circuito di azionamento dell'ancoretta del vibratore. Comunque la stessa venga mantenuta in vibrazione il funzionamento del circuito è tale che l'ancoretta, oscillando di moto sincrono fra i due contatti stabilisce alternativamente il passaggio di corrente dalla batteria alle due metà del primario del trasformatore.

Poichè i due contatti sono montati su suporti elastici e cedevoli il tempo di permanenza della corrente è notevolmente più lungo di quello di transizione dell'ancoretta da un contatto all'altro, sicchè l'andamento della corrente erogata dalla batteria assume la forma indicata nella figura 52 A mentre il flusso da essa prodotto nel trasformatore, considerando che le ampère-spire di ogni semi primario hanno segno opposto, risulta quello della fig. 52 B.

Poichè una forma d'onda come questa risulterebbe eccessivamente ripida con conseguente formazione di extracorrenti nei contatti ed extratensioni negli avvolgimenti a causa della troppo brusca interruzione del circuito, si provvede sempre a smussare lo scalino esistente fra i punti BCDE mediante l'applicazione di un condensatore in parallelo al primario o al secondario del trasformatore atto ad immagazzinare energia elettrica nei tratti AB ed EF per restituirla durante i periodi di transizione. Con questo accorgimento, se la capacità è esattamente calcolata (1)

(1) Il valore della capacità da porre in parallelo all'intero avvolgimento primario per conseguire lo scopo è dato dalla formula:

$$C = \frac{(1 - \vartheta)\, I_m \cdot 10^6}{8\, f\, V_B}$$

in cui C risulta in microfarad mentre I_m è la corrente magnetizzante (praticamente la corrente a vuoto) ed è espressa in Amp. mentre V_B è la tensione in volt della batteria. Il significato del termine ϑ è spiegato nel corso del testo.

Poichè il valore di C così determinato risulta sempre piuttosto grande, è preferibile mettere il condensatore in parallelo al secondario: in tal caso la reattanza riflessa sul primario viene moltiplicata per il quadrato del rapporto spire secondario/spire primario. Il valore necessario viene così notevolmente ridotto: per converso aumenta la necessità di una elevata resistenza alla perforazione del condensatore avuto riguardo che ad esso risultano applicate anche elevate tensioni a RF.

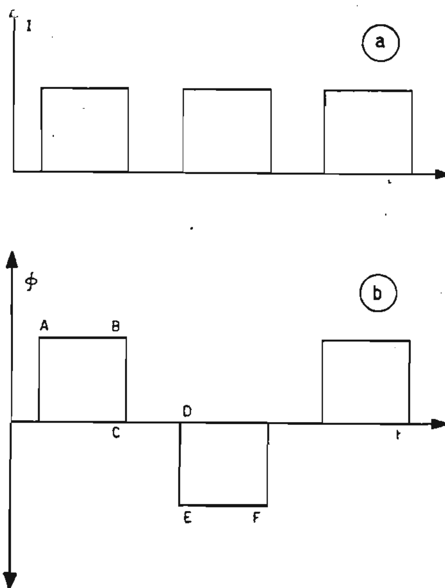


Fig. 52 - Forma d'onda della corrente di batteria e del flusso nel trasformatore di fig. 51.

la forma d'onda generata dal vibratore viene ridotta a quella della fig. 53 che, sebbene ancora lontana dall'andamento sinusoidale a noi ben noto, è certo più vicina ad esso di quanto non lo fosse precedentemente.

Chiusa questa premessa, necessaria per renderci conto del genere di corrente con il quale avremo a che fare, vediamo ora quali siano gli accorgimenti da mettere in opera nel calcolare un trasformatore che sia alimentato da una corrente di questo genere.

La frequenza di oscillazione di un normale vibratore per uso radio è in genere compresa fra 80 e 120 periodi al secondo: circa doppia quindi di quelle che siamo abituati a considerare. Inoltre la forma sub-rettangolare della corrente può essere considerata, secondo quanto insegna la teoria dello sviluppo in serie di Fourier, come la somma di una serie infinita di onde di forma sinusoidale, la prima di queste onde essendo di frequenza pari a quella della corrente considerata e le successive di frequenza tripla, quintupla, e così via per armoniche dispari, le pari non esistendo a causa della forma simmetrica della corrente considerata.

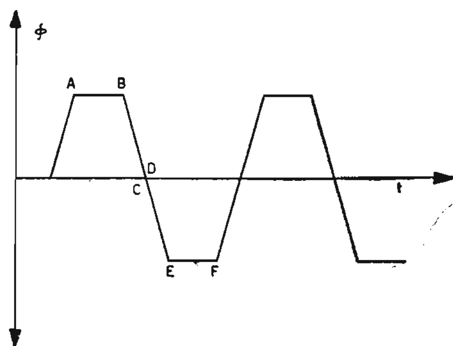


Fig. 53 - Forma d'onda corretta dal condensatore di smusso.

Ne consegue che, non solo abbiamo a che fare con una frequenza fondamentale superiore a quella normalmente considerata, ma anche con altre di valore superiore: il che, tenendo presente quanto abbiamo detto a proposito delle perdite in funzione della frequenza, tende ad esagerare le perdite nel ferro del trasformatore.

Altra considerazione importante da fare è che l'induttanza di dispersione del trasformatore deve essere quanto più possibile ridotta per evitare scintillamento eccessivo e relativa usura sui contatti del vibratore, mentre d'altra parte è bene che la corrente magnetizzante sia piccola per non dover eccedere nel dimensionamento del condensatore di smusso (vedi la nota 1).

I principali requisiti di un buon trasformatore per vibratore sono quindi: bassa corrente magnetizzante, bassa induttanza dispersa e perdite limitate nel nucleo magnetico, il che equivale a dire basse sollecitazioni, ottimo disegno e materiali di qualità.

Si noti che i tre requisiti sopra elencati sono in parte contrastanti fra loro perchè una diminuzione dell'induzione magnetica, favorevole alla riduzione della corrente magnetizzante e delle perdite, richiede un aumento di spire e quindi dell'induttanza e nello stesso senso agisce una riduzione nel volume del ferro, onde il miglior dimensionamento di un trasformatore per vibratore va ricercato, come quasi sempre accade, in un giusto compromesso che tenga

conto della qualità dei materiali disponibili.

In linea di massima si può dire che un buon trasformatore di questo tipo va costruito tenendo per base:

Induzione magnetica non superiore a 8.000-9.000 linee/cm².

Lamierini a perdita molto bassa (1,1-1,3 W/Kg).

Avvolgimenti primario e secondario compenetrati.

Per quanto riguarda l'esecuzione pratica di questi trasformatori si noti che, data la loro applicazione, essi hanno sempre un primario a due avvolgimenti in controfase mentre non hanno in genere avvolgimenti secondarii a bassa tensione, dato che la presenza della batteria permette di trarne direttamente l'alimentazione dei filamenti e talvolta anche quella di polarizzazioni fisse: onde il tipo classico, accanto al primario già considerato, allinea un secondario A. T. che spesso è in controfase se la tensione alternata è rettificata da una valvola termoionica ma che può essere anche un semplice avvolgimento unico se il raddrizzamento viene ottenuto con un rettificatore metallico che a sua volta può essere collegato a semionda, duplicatore di tensione o a ponte di Graetz. L'uso di duplicatori di tensione metallici è, fra l'altro, assai sviluppato nei flash elettronici portatili che necessitano di alte tensioni e piccole correnti. Talora ancora, come è noto, si fa impiego addirittura di un secondo paio di contatti sul vibratore per ottenere automaticamente la rettificazione della tensione secondaria (fig. 54) ma questo sistema, ad onta dei vantaggi di semplicità ed economia che comporta, non è molto usato per le inerenti difficoltà di messa a punto ed eliminazione dei disturbi a RF nel circuito anodico.

Comunque, qualunque sia il sistema di rettificazione usato, il calcolo di un trasformatore per vibratore non differisce da quello di uno normale se si tien conto delle particolari avvertenze relative.

Si abbia presente innanzitutto che la potenza geometrica è assai più grande di quella secondaria per la presenza di uno o due avvolgimenti in controfase ed inoltre è necessario

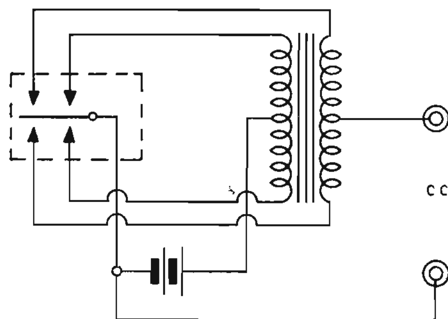


Fig. 54 - Rettificazione con vibratore sincrono.

largheggiare nel rame, sia per le note ragioni della corrente impulsiva, sia perchè il rendimento in una apparecchiatura alimentata a batteria è di primaria importanza.

Naturalmente, dato il particolare impiego, le potenze di questi trasformatori, salvo rare eccezioni, risultano sempre piccole: in genere sono comprese fra 5 e 15 VA: per le considerazioni ora svolte, e ad onta della maggior frequenza di lavoro, essi hanno però le dimensioni di un trasformatore normale di potenza quasi doppia e come tali vanno considerati nell'uso delle formule di

orientamento per la ricerca della sezione del nucleo.

Altro elemento di diversificazione dai normali trasformatori è il valore della tensione con cui effettuare il calcolo del primario: difatti, con le consuete correnti industriali, la tensione viene già specificata nel suo valore efficace: nel nostro caso si conosce invece solo il valore della tensione della batteria che ovviamente rappresenta il valor massimo dell'onda considerata. Facili deduzioni ci portano a determinare che il valore efficace di un'onda rettangolare, come è quella in questione, è dato dalla espressione:

$$V_{eff} = V_B \sqrt{\theta}$$

ove V_B è la tensione in volt della batteria e θ il cosidetto « fattore di efficienza », ovverossia il valore del rapporto fra il tempo per cui i contatti rimangono effettivamente chiusi e la durata del periodo. Questo dato viene fornito dal costruttore del vibratore ma è comunque compreso fra 0,75 e 0.90: esso dipende anche dalla tensione della batteria dato che con essa aumenta l'ampiezza della vibrazione.

La tensione efficace primaria da considerare è naturalmente quella corrispondente alla massima tensione di batteria possibile: occorre quindi a questo riguardo considerare se la batteria può raggiungere una tensione superiore alla nominale (installazioni in cui la batteria venga caricata durante l'uso, tipico esempio quelle a bordo di autovetture) oppure se questa eventualità sia da escludere (apparecchiature portatili con batteria autonoma). La determinazione del numero di spire primarie si farà evidentemente in base alla massima tensione raggiungibile.

La frequenza, altro dato importante del calcolo, varia a seconda della marca del vibratore: il suo valore è sempre precisato dalla fabbrica costruttrice e si aggira, come abbiamo già detto, sui 100 periodi al secondo: è scarsamente influenzato dalla tensione della batteria dato che la frequenza di vibrazione dipende solo dalla massa ed elasticità dell'ancoretta oscillante.

Il procedimento di calcolo, una volta in possesso dei dati di cui sopra, è del tutto normale e si svolge quindi con la successione:

1) determinazione della tensione efficace primaria;

2) scelta di un appropriato valore dell'induzione magnetica;

3) determinazione della sezione del nucleo, pari a circa il doppio di quella di un trasformatore normale di pari potenza;

4) calcolo delle spire/volt in base alla solita formula;

5) calcolo della sezione del rame tenendo presenti le circostanze che entrano in giuoco in un avvolgimento controfase e non superando il valore di 2,5-3 A/mm^2 per la corrente specifica;

6) verifica di ingombro secondo il noto procedimento.

La pratica costruttiva non differisce gran che da quella tradizionale se si eccettua l'eventuale compenetrazione degli avvolgimenti per ridurre l'induttanza dispersa: a questo proposito occorre precisare che nel fare l'intercalamento degli avvolgimenti si deve evitare di rendere diversa la

resistenza dei due semi-primarii, in quanto questo produrrebbe un nocivo sbilanciamento di carico sul vibratore; conseguentemente l'avvolgimento del semiprimarii affiancati è, sebbene difficoltoso, consigliabile.

Come ultima considerazione aggiungeremo che, stante la presenza nel circuito di contatti scintillanti, gli avvolgimenti sono percorsi da discrete correnti a RF onde tutto il trasformatore diviene un radiatore di energia a radiofrequenza; per cui una schermatura elettrostatica ed elettromagnetica completa del trasformatore si rende necessaria quasi sempre per evitare disturbi.

Per la presenza di queste tensioni a RF anche l'isolamento va curato in modo speciale dato che in particolari condizioni le stesse possono raggiungere valori molto elevati provocando scariche interne o fra gli avvolgimenti e massa.

Per la prova di questi trasformatori occorre senz'altro realizzare il circuito di effettivo impiego con i componenti previsti: in sede sperimentale, quando non si disponga di oscillografo per il controllo della forma d'onda da cui si possono trarre sicure deduzioni su eventuali difetti, un semplice metodo consiste nella misura della corrente assorbita dalla batteria essendo certo che il minimo consumo primario, per carico costante, rappresenta sempre la migliore condizione di funzionamento del complesso.

CALCOLI DI MINIMO COSTO

Considerazioni generali.

Ci siamo occupati, nei capitoli precedenti, del calcolo teorico e della costruzione di un trasformatore, senza tener conto alcuno del costo di costruzione: abbiamo visto come un trasformatore rispondente a determinate caratteristiche possa essere realizzato con svariatissime proporzioni fra ferro e rame, non essendo teoricamente il nucleo magnetico una funzione univoca della potenza; abbiamo anche accennato che la scelta del nucleo magnetico era più che altro una questione economica; ma non si è in alcun modo precisato come si potesse calcolare il circuito magnetico in modo da scegliere, fra le tante soluzioni possibili, quella che alla fine realizzasse il costo minore, restando beninteso inalterate le caratteristiche elettriche ed il buon funzionamento del trasformatore.

In altre parole, quanto ora ci proponiamo di studiare può essere così enunciato: fra le infinite soluzioni del problema che si possono ottenere con diverse dimensioni del circuito magnetico ve n'è certamente una che soddisfa alla condizione di costo minimo: come si può determinare questo dimensionamento optimum?

Una prima considerazione pratica ci dice che il costo del trasformatore consta di due termini principali: costo del ferro e costo del rame; e di altri termini di minor importanza come il costo degli isolanti ed il costo di mano d'opera. Per via deduttiva si può dimostrare però che i termini secondari del costo sono in definitiva funzioni più o meno lineari del costo dei due termini principali (così il costo degli isolanti è proporzionale al peso di rame, la mano d'opera è funzione in parte del peso del rame e in parte di quello del ferro, ecc) sicchè in definitiva è sufficientemente preciso il considerare il costo, in termini relativi, proporzionale alla somma dei costi del solo ferro e rame, il che semplifica notevolmente il problema.

Un primo sguardo d'assieme all'impostazione di questo calcolo ci avverte che, evidentemente, i risultati dipenderanno grandemente da quello che sarà il rapporto dei prezzi unitari dei due materiali, per cui un progetto in cui si voglia realizzare la condizione di costo minimo non potrà ragionevolmente aver luogo se i prezzi non saranno stabilizzati, se non nel loro valore assoluto, almeno nei loro reciproci rapporti o quantomeno non si abbiano già tali materiali approvvigionati completamente per tutta la serie da costruire.

Come facilmente si capisce, un calcolo di minimo costo implica che la serie da costruire sia notevole (non meno di 1000 pezzi all'incirca) dato che, come vedremo in seguito, il risultato finale del calcolo darà con ogni probabilità delle dimensioni per il lamierino non riscontrabili nei tipi di normale commercio, onde si renderà necessaria la costruzione di una attrezzatura speciale per la tranciatura del lamierino determinato; costruzione che, se ammortizzata su quintali e quintali di tranciato, riuscirà non maggiormente gravosa di quella della manutenzione di un ferro trancia esistente, mentre sarebbe insopportabile per una serie limitata e toglierebbe ogni vantaggio economico al progetto.

Pertanto, i calcoli e le considerazioni che seguono hanno un valore ed un significato soltanto per le costruzioni di grande serie (ed è per questo che il presente capitolo rappresenta soltanto un'appendice di un manuale particolarmente destinato ai piccoli costruttori); serie in cui, anche riferendosi ad un lamierino esistente, la duplicazione del ferro di trancia si renderebbe conveniente per la imponente quantità di materiale da lavorare (si pensi che solo 1000 trasformatori per normali apparecchi radio richiedono un quantitativo di lamierini che, a peso netto, si avvicina alle due tonnellate!).

Già nei tempi passati diversi autori si sono occupati del minimo costo di un trasformatore; e dato che il problema, come vedremo in seguito, è piuttosto involuto, lo hanno affrontato partendo da basi diverse e soprattutto adottando particolari semplificazioni che ne rendano la soluzione matematicamente possibile: tali semplificazioni o presunzioni intuitive sono state però talvolta spinte così oltre da togliere ogni generalità ai risultati se non addirittura da condurre a risultati errati.

Lo studio sull'argomento più recente e completo, condotto con sviluppi matematici abbastanza complessi ma ineccepibili, è stato fatto da due tecnici olandesi della Philips, H.C. Hamaker e Th. Hehenkamp (*). La trattazione del loro modo di risolvere il problema è qui appresso sunteggiata e commentata per la parte che più specificamente si attiene all'oggetto di questo libro e cioè ai trasformatori con nucleo a mantello, trascurando i casi, pure considerati dagli autori, dei nuclei magnetici di diverso tipo e conformazione. Stabilito, come poco prima abbiamo determinato anche noi, che il costo di un trasformatore possa considerarsi praticamente proporzionale alla somma dei costi e del rame impiegati

(*) *Philips Research Reports* - Vol. 5, N. 5, Ottobre 1950. H. C. Hamaker e Th. Hehenkamp: Minimum cost transformers and chokes, Parte I, pagg. 357-394.

nella costruzione, gli autori definiscono i termini del problema ponendo che, per il trasformatore considerato, siano state anticipatamente stabilite le perdite totali. E' evidente infatti, secondo le considerazioni ripetutamente svolte in questo libro, che non sarebbe possibile determinare delle condizioni finite per la costruzione di un trasformatore quando non venisse previamente fissato: o il valore dell'induzione magnetica e corrente specifica nel rame, o le perdite nel ferro e la corrente specifica, o viceversa l'induzione e le perdite nel rame, o finalmente il valore delle perdite globali nel ferro e nel rame.

Gli autori si attengono a questo ultimo dato, evitando quindi un legame aprioristico fra le perdite nel ferro e quelle nel rame poichè questo legame fisserebbe già praticamente i rapporti ferro - rame, proporzionali ai pesi; con esso resta perfettamente definito il problema.

La soluzione del problema secondo Hamaker e Hehenkamp.

Ed ecco come la soluzione viene matematicamente impostata dagli autori. Si consideri la fig. 51 in cui sono rappresentate le principali dimensioni di un trasformatore relativamente al ferro ed al rame: facili considerazioni geometriche ci portano a concludere che il volume di ferro del circuito magnetico è definito dall'espressione:

$$Vl_{fe} = 2\ HL\ (A + B + L) \qquad \text{(VI-1)}$$

mentre quello dell'avvolgimento sarà:

$$Vl_{cu} = 2\ AB\ (H + L + \pi/2\ B) \qquad \text{(VI-2)}$$

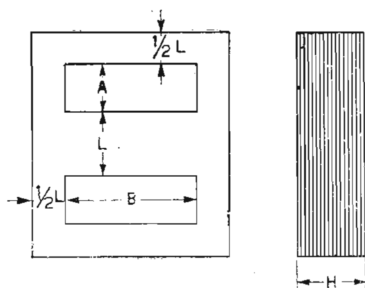


Fig. 55 - Nucleo magnetico per trasformatori monofasi con lamierini a mantello.

Se con α e β si designano il doppio del costo per unità di volume rispettivamente del ferro e del rame, ovviamente il costo relativo del trasformatore risulta espresso da:

$$C_t = \alpha\,.\,HL\ (A + B + L) + \beta\,.\ AB\ (H + L + \pi B/2) \qquad \text{(VI-3)}$$

Si devono ora porre le due condizioni che gli autori hanno posto a base del loro calcolo: e cioè che le dimensioni del trasformatore siano tali da poter contenere la potenza

virtuale VA' e che le perdite globali nel ferro e nel rame raggiungano il valore W_d fissato in partenza.

Abbiamo già visto (Parte II, Capitolo 7) quale sia la relazione che lega la potenza virtuale alle dimensioni geometriche del trasformatore: con facili passaggi essa può essere messa nella forma:

$$VA' = C \cdot ABHL \cdot B_m \cdot J \qquad \text{(VI-4)}$$

ove la costante C raggruppa tutti i termini che non è in nostro potere di modificare e cioè:

$$C = 4{,}44 \cdot f \cdot k_t \cdot k_{fe} \cdot 10^{-6} \qquad \text{(VI-5)}$$

se le misure di lunghezza sono espresse, come al solito, in cm, B_m in gauss, J in A/mm^2 e VA' in VA.

Consideriamo ora la questione delle perdite totali. Ricordando quanto detto nella parte generale circa la dipendenza delle perdite nel rame e nel ferro rispettivamente dal quadrato della corrente specifica e dal quadrato dell'induzione magnetica (quest'ultimo asserto non assolutamente esatto, ma sufficientemente preciso agli effetti pratici) e chiamando con γ e δ rispettivamente il doppio delle perdite per unità di volume nel ferro e nel rame, è facile stabilire che le perdite totali potranno essere espresse come segue:

$$W_d = \gamma \left(\frac{B_m}{10\,000}\right)^2 HL\,(A+B+L) + \delta \cdot J^2 \cdot AB\,(H+L+\pi B/2) \qquad \text{(VI-6)}$$

Le tre equazioni (VI-3), (VI-4) e (VI-6) ora determinate, esprimono i termini del problema. Il calcolo differenziale insegna che il minimo valore del costo C_t espresso dalla (VI-3) e soggetto alle restrizioni definite dalle (VI-4) e (VI-6) può essere trovato ricercando il minimo della espressione unica:

$$C_t = \alpha \cdot HL\,(A+B+L) + \beta \cdot AB\,(H+L+\pi B/2) + y\left[W_d - \gamma \cdot \left(\frac{B_m}{10\,000}\right)^2 HL\,(A+B+L) - \delta \cdot J^2 \cdot AB\,(H+L+\pi B/2)\right] + z\left[VA' - C \cdot ABHL \cdot B_m \cdot J\right] \qquad \text{(VI-7)}$$

ove y e z sono variabili ausiliarie ed A, B, H, L, B_m, J le sei variabili di cui dobbiamo determinare il valore.

La ricerca del minimo nell'espressione (VI-7) viene condotta matematicamente eseguendo otto successive derivazioni dell'espressione stessa rispetto a ciascuna delle otto variabili in essa contenute. Questi sviluppi del calcolo portano ad espressioni matematiche di passaggio che, sebbene semplici, risultano notevolmente lunghe e involute; dato lo scarso interesse che la loro esposizione avrebbe per la maggior parte dei lettori, abbiamo ritenuto opportuno non riportare l'intero svolgimento matematico limitandoci ad enunciare le formule finali risolutive.

Dobbiamo però segnalare due notevoli risultati che sorgono nel corso dello sviluppo del calcolo: essi sono:

1) *Perchè le condizioni di minimo costo siano soddisfatte, occorre anzitutto che le perdite nel ferro risultino eguali a quelle del rame.*

2) *Il rapporto* H/L *fra lo spessore del pacco e la larghezza del nucleo corrispondente ad un costo minimo oscilla fra un valore massimo di* 2,57

ed uno minimo di 2. Il valore preciso è in dipendenza del rapporto L/B.

Questi risultati intermedi sono oltremodo interessanti e si prestano ad alcune considerazioni che crediamo utile anticipare alle conclusioni definitive. La prima condizione enunciata sfata la convinzione abbastanza diffusa che per ottenere un trasformatore di costo minimo si debbano avere costi parziali del ferro e del rame eguali fra di loro, questo fatto raramente accordandosi in pieno con quanto sopra e comunque senza connessione con esso.

La seconda condizione ci dice che la sezione del nucleo corrispondente al minimo costo ha sempre una forma rettangolare piuttosto allungata nel senso del pacco, con rapporto fra i lati variabile in limiti piuttosto ristretti; va notato infatti che i valori estremi di questo rapporto non si raggiungono mai in pratica, corrispondendo a rapporti L/B assurdi.

Il risultato appare tanto più interessante in quanto esso contrasta con quanto intuitivamente si sarebbe portati a immaginare. L'intuizione ci porterebbe difatti a supporre che la più adatta forma del nucleo fosse quella quadrata in quanto a parità di sezione di ferro la lunghezza della spira media risulta la più corta possibile: ma è chiaro che questa intuitiva ipotesi non tiene conto di tutti gli altri termini che entrano in giuoco.

Il valore esatto del rapporto H/L dipende, come si è detto, dal valore del rapporto L/B e da quest'ultimo dipende anche il valore di A. Se il rapporto L/B fosse stato fissato da noi in precedenza come pregiudiziale, anche i rapporti H/L e A/L risulterebbero automaticamente determinati (si noti che con ciò non si determinano i valori assoluti degli elementi geometrici, ma solo i rapporti fra di essi).

Un caso particolare che è interessante considerare, perchè in esso si ha, per considerazioni geometriche, prefissato in partenza il rapporto L/B, è quello dei lamierini ad E con listello (fig. 29) il cui uso è larghissimamente generalizzato in America ed anche in Italia per il risparmio di materiale che esso comporta nella tranciatura (escluso il caso di utilizzo di ritagli di altre lavorazioni, come già detto). In questo tipo di lamierino il rapporto L/B risulta eguale a 2 o molto approssimativamente vicino a questo valore. Escludendo le formule ed i passaggi numerici diciamo addirittura che con tale assunto si otterrebbe:

$$L = 2\,B \qquad A = 1{,}16\,L \qquad H = 2{,}19\,L$$

con il che si soddisferebbero le condizioni di minimo costo (relative, non essendo libera la determinazione di B indipendentemente da L). Invece nel tipo di lamierino citato si verifica automaticamente che:

$$A = 1{,}5\,L$$

condizione che non corrisponde evidentemente col risultato di $A = 1{,}16\,L$ prima trovato, il che ci dice che questo tipo di lamierino non sarà mai il tipo ideale per un trasformatore di minimo costo, se si prescinde dal risparmio di costo per chilo del lamierino stesso (ossia quando si consideri che il costo per chilo del la-

mierino sia indipendente dalla sua forma risultante dal calcolo).

Riprendendo la discussione sul rapporto H/L, se consideriamo il possibile rapporto L/B come generalmente variabile tra un minimo di 1 ed un massimo di 2, si calcola facilmente che corrispondentemente il rapporto H/L varia tra 2,28 e 2,19: il che significa che in genere, prescindendo dalla forma che possa assumere il lamierino, una delle condizioni per un costo minimo è quella di fare il pacco con uno spessore di ca. 2,2 volte la larghezza del nucleo. Questo criterio, cioè di fare pacchi lamiere molto allungati, in omaggio ai risultati suesposti è con notevole rigorosità seguito dagli Americani nelle loro costruzioni: ben lo sa chi ha una qualche familiarità con esse. In Italia si preferisce in genere costruire invece trasformatori con nuclei poco allungati o addirittura quadrati: non so se per conseguenza della errata convinzione di cui dicevo prima o se per questioni di praticità costruttiva dell'avvolgimento, in quanto bisogna convenire che se il nucleo molto allungato risulta favorevole per l'economia del costo, d'altro canto la forma fortemente rettangolare del cartoccio porta ad avvolgimenti piuttosto rigonfi sui lati lunghi con conseguente maggiore ingombro e riduzione quindi del coefficiente di utilizzazione finestra che pure è, come si vedrà, uno degli elementi che determinano il minimo costo. Inoltre il costo della mano d'opera è in genere più oneroso con siffatti avvolgimenti a causa della ridotta velocità di lavorazione che questi cartocci molto piatti impongono in confronto dei cartocci a forma quadrata.

Con successive sostituzioni nel sistema di equazioni ottenute con la derivazione della (VI-7) gli autori giungono finalmente ad un sistema di due sole equazioni risolutive che contengono unicamente le incognite L e B (A ed H sono legate ad L e B tramite le relazioni precedentemente citate): queste equazioni si presentano sotto forma di polinomi piuttosto complessi tanto che il loro sviluppo condurrebbe ad un sistema di due equazioni di settimo od ottavo grado in L e B, matematicamente irresolubile.

Allo scopo di sormontare la difficoltà gli autori ricorrono all'espediente del calcolo grafico, calcolando numericamente sotto forma tabellare i diversi valori del rapporto β/α che risultano qualora si fissino successivamente diversi valori del rapporto L/B nella prima equazione: indi con inversione dei risultati ottengono una tabella in cui, dati i diversi rapporti β/α praticamente verificantisi, si hanno i corrispondenti rapporti L/B per cui si attua la condizione di minimo costo.

Facendo successivo uso della seconda equazione e procedendo in modo analogo si ottengono finalmente i separati valori di L e B sempre in funzione della variabile β/α: e da questi è agevole calcolare anche le grandezze A ed H ad esse collegate da relazione semplici.

In definitiva gli autori possono definire le grandezze ricercate A, B, H, L, nella forma qui sotto riportata:

$$A = \varrho \cdot f_A \qquad B = \varrho \cdot f_B$$
$$H = \varrho \cdot f_H \qquad L = \varrho \cdot f_L \qquad \text{(VI-8)}$$

in cui ϱ è un termine che raggruppa tutte le costanti del calcolo mentre le espressioni f_A e simili sono funzioni del solo rapporto β/α.

In calce all'articolo gli autori riportano infatti una serie di tabelle in cui le funzioni f_A, f_B, f_H, f_L sono riportate per una gamma di valori del rapporto β/α di ampiezza sufficiente per ogni caso della pratica.

Analogamente il costo del trasformatore, espresso in termini di arbitrarie unità monetarie (prezzo relativo) risulta calcolabile come:

$$C_t = f_C \cdot \varrho^3 \sqrt{\alpha \beta} \qquad \text{(VI-9)}$$

in cui f_C ha un significato esattamente analogo a quello delle funzioni prima citate.

Una volta costruite, con paziente calcolo numerico, le tabelle delle funzioni f_A e simili, il compito del calcolatore risulta estremamente facilitato, tutto riducendosi in definitiva al conteggio della costante ϱ che dipende, come si è detto, da tutte le grandezze invariabili o prefissate che costituiscono i termini base della ricerca. Diamo pertanto qui sotto la espressione della costante ϱ:

$$\varrho = 2 \frac{VA'}{W_d} \sqrt{\frac{\gamma \delta}{\varepsilon^2}} \qquad \text{(VI-10)}$$

ove a sua volta:

$$\varepsilon = 0{,}0444 \,.\, f \,.\, k_f \,.\, k_{fe} \qquad \text{(VI-11)}$$

mentre γ e δ hanno il significato già esposto al principio del capitolo.

Queste formule e quelle che seguiranno comportano costanti valevoli quando B_m sia espresso in Wb/m² anzichè come di solito in gauss. Abbiamo ritenuto opportuno conservare questa unità di misura, usata dagli Autori, perchè conduce a cifre di calcolo senza troppi zeri dopo la virgola facilitando i conteggi ed evitando errori.

Una eventuale semplificazione del valore di ε può aversi notando che la frequenza di calcolo in Italia è sempre 42 oppure 50 Hz mentre il coefficiente di stipamento lamierini k_{fe} per un normale trasformatore tipo radio non è mai molto differente da 0,9: si può pertanto scrivere, con piccoli insignificanti arrotondamenti:

per $f = 42$ Hz: $\varepsilon_{42} = 1{,}68\, k_f$ (VI-12)

per $f = 50$ Hz: $\varepsilon_{50} = 2\, k_f$ (VI-13)

Veniamo ora alla pratica del calcolo. Per semplificare al massimo i conteggi per coloro che vi hanno scarsa dimestichezza abbiamo riportato al termine del testo dei diagrammi con i quali è semplice determinare i vari elementi per via puramente grafica. Anche i valori delle funzioni f_A, f_B, f_H, f_L, f_C sono stati da noi riportati sotto forma di diagramma anzichè di tabella: abbiamo preferito questo sistema, sia perchè permette una più facile ricerca dei valori interpolati, sia perchè non offre adito ad errori tipografici, non sempre controllabili.

Ed ecco l'elenco dei termini base del calcolo:

VA' = potenza apparente totale del trasformatore, in VA.

W_d = perdite totali nel ferro e nel rame, in watt.

f = frequenza minima della rete di alimentazione, in Hz.

C_{fe} = costo del ferro, in lire/Kg.

C_{cu} = costo del rame, in lire/Kg.

W_{fe} = perdite specifiche nel ferro, relative a $f = 50$ Hz e $B_m = 10\,000$ gauss, in watt/Kg.

k_f = coefficiente di utilizzazione finestra.

Prima di procedere oltre riteniamo fare qualche breve considerazione pratica su questi elementi base. Nulla da dire su VA', valore calcolabile facilmente e con grande esattezza in base alle considerazioni già svolte a suo tempo nella parte generale. Per le perdite totali W_d le cose sono un po' diverse: qualora questo valore non ci sia stato imposto dal cliente, sta a noi fissarlo in modo che non sia eccessivo (riscaldamento pericoloso) o troppo basso (inutile spreco di materiali quando il calcolo viene condotto proprio per risparmiare). Non conoscendosi a priori le dimensioni del trasformatore e quindi la sua superficie di dissipazione del calore, questo dato va fissato per pratica tenendo conto delle considerazioni già svolte a questo proposito in altra parte.

Frequenza f e costo unitario del ferro C_{fe} sono elementi precisi ben noti in partenza: non altrettanto può invece dirsi del costo unitario del rame C_{cu}: questo valore dipende in larga misura dalla sezione del filo impiegata nella costruzione, che ancora non conosciamo e che soprattutto è diversa per i singoli avvolgimenti. Non ci resta quindi che fare un conto approssimativo della media ponderale dei probabili singoli prezzi introducendolo nel calcolo con riserva di verifica a posteriori.

Le perdite specifiche nel ferro W_{fe} sono un dato abbastanza preciso se si parte da un lotto di lamiera magnetica omogeneo e con perdite garantite o previamente sottoposto a prove di controllo perdite: ovviamente il ragionamento cade se si fa uso di ritagli per tranciare il lamierino occorrente.

Il coefficiente di riempimento finestra k_f è un altro elemento incerto, ma meno di quanto si possa credere: il costruttore pratico sbaglia di poco nel determinarlo specie quando debba costruire un trasformatore simile ad altri già sperimentati.

Concludendo constatiamo che nelle basi del nostro calcolo vi sono elementi di maggiore o minore incertezza, naturalmente a seconda della pratica del calcolatore. Se si vuole che il calcolo riesca effettivamente preciso e quindi giustificato, non resta allora che effettuarlo una prima volta con i dati approssimati e ripeterlo quindi con i dati controllati su di un campione sperimentale. Se i primi dati, come in genere avviene, non si scostano troppo da quelli reali, non v'ha dubbio che il secondo tentativo condurrà senz'altro ad un risultato di notevole precisione.

Vediamo ora come si svolge praticamente il conteggio:

1) A mezzo del diagramma V si determina il rapporto β/α sulla base del prezzo del ferro, di quello del rame e del coefficiente k_f.

2) A mezzo del diagramma VI, entrando in esso con il valore di k_f e di f, si determinano δ ed ε.

3) Analogamente, con il diagramma VII, entrando in esso con il valore di W_{fe} si determina γ.

4) Infine, e questa volta con il normale calcolo aritmetico, si trova:

$$\varrho = 2 \frac{VA'}{W_d} \sqrt{\frac{\gamma \delta}{\varepsilon^2}} \qquad \text{(VI-10)}$$

5) Si ricercano poi, nel diagramma VIII i valori delle funzioni f_A, f_B, f_H, f_L, f_C.

6) Non resta ora che determinare, a mezzo delle (VI-8) e (VI-9), i ricercati valori di A, B, H, L e C_t.

Per poter elaborare i dati pratici di avvolgimento del trasformatore di cui abbiamo determinato nel modo suddetto le caratteristiche del pacco lamellare, ci è però necessario conoscere anche l'induzione B_m (calcolo delle spire/volt) e la corrente specifica J (sezione dei conduttori). Questi due termini risultano implicitamente determinati dalla condizione da noi posta di una certa perdita totale e sono legati alle dimensioni geometriche di cui abbiamo trovato i valori dalle relazioni che seguono, relazioni che si trovano nel corso dello svolgimento del calcolo differenziale da noi non riportato:

$$B_m = 10^4 \sqrt{\frac{W_d}{2 \gamma \, HL \, (A + B + L)}} \text{ gauss} \qquad \text{(VI-14)}$$

$$J = \sqrt{\frac{W_d}{2 \delta \, AB \, (H + L + \pi B/2)}} \text{ Amp/mm}^2 \qquad \text{(VI-15)}$$

Esempio pratico.

A miglior chiarimento di quanto sopra effettueremo ora un calcolo pratico, mettendo poi in confronto i risultati con quelli che si sarebbero ottenuti per via normale.

Siano da calcolare i dati per un trasformatore in base agli elementi seguenti:

$VA' = 200$ VA
$W_d = 10$ W
$f = 50$ Hz
$C_{fe} = 400$ Lit/Kg.
$C_{cu} = 1100$ Lit/Kg.
$W_{fe} = 2,5$ W/Kg.
$k_f = 0,32$

1°) Dal diagramma V ricaviamo $\beta/\alpha = 1,145$

2°) Dal diagramma VI ricaviamo $\gamma = 34,1 \cdot 10^{-3}$

3°) Dal diagramma VII ricaviamo $\delta = 12,85 \cdot 10^{-3}$ $\quad \varepsilon = 0,64$

4°) Calcoliamo ora il valore di ϱ mediante la (VI-10):

$$\varrho = 2 \frac{200}{10} \sqrt{\frac{34,1 \times 12,85 \times 10^{-6}}{0,64^2}} =$$

$$= 40 \sqrt{\frac{437 \times 10^{-6}}{0,41}} = 1,312$$

5°) Nel diagramma VIII troviamo:

$f_L = 2.177$ $\qquad f_B = 1.839$

$f_A = 4.128$ $\qquad f_H = 4.923$

e quindi:

L = 2,86 cm $\qquad$ B = 2,41 cm

A = 5,42 cm $\qquad$ H = 6,45 cm

Seguendo il nostro abituale concetto di commentare i risultati ogni qualvolta se ne presenti l'occasione, riteniamo utile far notare che, in definitiva, le misure del lamierino sono inversamente proporzionali al rapporto W_d/VA' e cioè alla percentuale di perdite ammesse relativamente alla potenza installata. Un errore nello stabilire questo rapporto potrebbe quindi portare a dei risultati sconcertanti se non vi fosse il modo di controllare la maggiore o minore ammissibilità del dato presunto calcolando a posteriori l'induzione nel ferro e la corrente specifica nel rame, dati di cui il progettista conosce in genere assai bene i valori pratici massimi adottabili senza pregiudizio per il buon funzionamento del trasformatore.

Effettuiamo quindi anche questi calcoli, a mezzo delle (VI-14) e (VI-15):

$$B_m = 10^4 \sqrt{\frac{10 \times 10^3}{2 \times 34{,}1 \times 2{,}86 \times 6{,}45\,(5{,}42 + 2{,}41 + 2{,}86)}} = 8.650 \text{ gauss}$$

$$J = \sqrt{\frac{10 \times 10^3}{2 \times 12{,}85 \times 5{,}42 \times 2{,}41\,(6{,}45 + 2{,}86 + 1{,}57 \times 2{,}41)}} = 1{,}51 \text{ Amp/mm}^2$$

Questi risultati ci avvertono che siamo stati eccessivamente cauti nel fissare il valore delle perdite: infatti sappiamo bene che una induzione di 8.650 gauss ed una corrente specifica di 1,51 Amp/mm² sono notevolmente bassi rispetto ai valori correnti per un trasformatore così piccolo: possiamo pertanto provare a portare il valore delle perdite a 12 W ricalcolando di nuovo le dimensioni del trasformatore; il che è molto agevole in quanto i valori delle funzioni f non dipendono da W_d mentre il valore di ϱ è inversamente proporzionale ad esso. Avremo pertanto, con leggeri arrotondamenti:

$\varrho = 1{,}09$ $\quad$ A = 4,5 cm $\quad$ B = 2 cm

H = 5,4 cm $\quad$ L = 2,4 cm

Ricontrollando B ed J si trova:

$B = 12\,400$ gauss $\qquad J = 2.18$ A/mm²

Questi valori si possono finalmente considerare soddisfacenti e quindi dovremo ritenere che il valore di 12 W ammesso per le perdite sia quello massimo tollerabile.

Osserviamo che tanto il valore di B_m che quello di J, come si può facilmente constatare nelle (VI-12) e (VI-13) sono direttamente proporzionali al quadrato di W_d: infatti, sotto al segno di radice quadrata delle relazioni anzidette compare W_d alla quarta potenza al numeratore, essendo le dimensioni che compaiono al denominatore a loro volta inversamente proporzionali a W_d (vedi VI-10). Sarebbe stato quindi facile prevedere, senza bisogno di rifare i calcoli, i nuovi valori di B_m ed J, in quanto essi avrebbero dovuto aumentare con

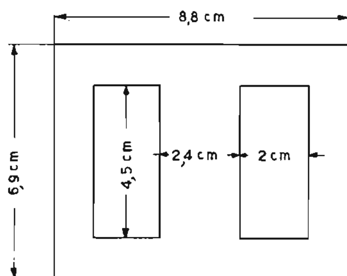
il rapporto $(12/10)^2 = 1{,}44$ come infatti si verifica.

Vogliamo fare anche un'altra considerazione, estremamente interessante al fine di valutare nella sua effettiva utilità l'applicazione delle formule del minimo costo. L'osservazione è questa: i valori di B_m ed J che risultano dalle (VI-12) e (VI-13) sono interdipendenti fra loro dovendosi, come già abbiamo visto, verificare che le perdite nel ferro eguaglino quelle nel rame: ciò significa che il calcolo ci può portare al ritrovamento di una coppia di valori per B_m ed J il cui rapporto fra loro non collimi con quello che sappiamo essere usato correntemente in pratica: in particolare si potrà avere un valore molto alto per l'induzione mentre la corrente specifica resta determinata ad un valore che normalmente sarebbe ritenuto eccessivamente prudenziale. L'esempio ora fatto rientra appunto in questo caso: noi non potremmo aumentare il dato perdite totali al disopra dei 12 W perchè altrimenti dovremmo tollerare induzioni magnetiche al disopra dei 12 400 gauss che sappiamo inammissibili, non perchè le perdite relative nel ferro diventino corrispondentemente troppo alte (esse saranno sempre eguali alla metà di quanto da noi fissato per le perdite totali), ma perchè così facendo si avrebbero correnti magnetizzanti eccessive, causa la caratteristica di saturazione del ferro, con conseguente aumento delle perdite anche nel rame primario, peggioramento del cos φ', aumento della caduta di tensione, ecc. Ne consegue che, seguendo strettamente i risultati del calcolo di minimo costo, facilmente si rischia di sacrificare le possibilità del rame per la limitazione imposta dalla saturazione del ferro, fenomeno che invece non ha nessuna ragione di influire sulla corrente specifica. Vedremo subito dopo come questo fatto infirmi notevolmente la convenienza del calcolo di minimo costo.

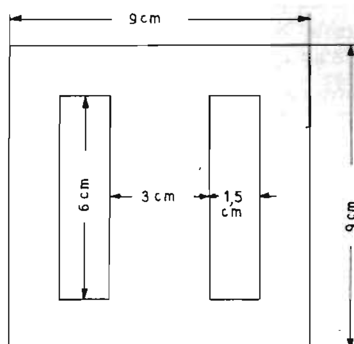
Verifichiamo ora il fatto che i conteggi effettuati precedentemente ci abbiano effettivamente condotti al trasformatore di minor costo possibile fra quelli aventi la stessa induzione e corrente specifica. Calcoliamo quindi quale sarebbe stato il costo di un altro trasformatore costruito partendo dagli stessi valori di B_m ed J e con lamierini di eguali perdite unitarie, ma di diversa forma e dimensioni. Dovremo pertanto scegliere un lamierino che presenti la stessa superficie di finestra e la stessa sezione di nucleo ma avente dimensioni lineari diverse.

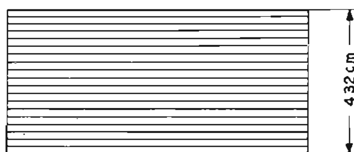
Questo lamierino è rappresentato nella parte destra della tabella a fianco, in cui abbiamo anche riportato il disegno del lamierino calcolato in base ai concetti del minimo costo. I termini comuni alle due costruzioni sono raggruppati in testa alla tabella, mentre nelle colonne 1 e 2 si vedono gli sviluppi per sommi capi dei conteggi dei pesi, costi, perdite e condizioni di raffreddamento dei due tipi messi a confronto.

Notiamo che, come dovevasi verificare, nel primo tipo le perdite nel ferro e nel rame sono esattamente









Dati comuni a tutti i trasformatori tabellati:

$f = 50$ Hz — Perdite ferro a 10.000 gauss e 50 Hz: 2,5 W/Kg.
$B = 12.400$ gauss — Perdite ferro a 12.400 gauss e 50 Hz: 3,8 W/Kg
Sezione lorda del nucleo magnetico: 12,96 cm² — Sezione finestra: 9 cm²
Costo rame: 1.100 L/Kg. Costo ferro: 400 L/Kg. $k_f = 0,32$ $k_{fe} = 0,9$

Colonna N°		1	2	3	4
Tipo del lamierino		**I**	II	**II**	**I**
Corr. specifica rame	A/mm²	**2,18**	2,18	3,0	**2,65**
Perdita specifica rame	W/Kg.	**10,6**	10,6	20,2	**15,7**
Superficie lamierino	cm²	**42,8**	63	63	**42,8**
Spessore del pacco	cm	**5,4**	4,32	4,32	**5,4**
Volume netto ferro	cm³	**207,5**	245	245	**207,5**
Peso ferro	gr.	**1620**	1910	1910	**1620**
Sezione netta rame	cm²	**2,88**	2,88	2,1	**2,36**
Lunghezza spira media	cm	**21,9**	19,4	18,1	**20,6**
Volume del rame	cm³	**63,2**	56	38	**48,5**
Peso del rame	gr.	**563**	498	338	**422**
Costo del ferro	L.	**648**	765	765	**648**
Costo del rame	L.	**620**	548	371	**475**
Costo totale	L.	*1268*	*1313*	*1136*	*1123*
Perdita ferro	W	**6**	7,1	7,1	**6**
Perdita rame	W	**6**	5,3	6,8	**6,8**
Perdita totale	W	*12*	*12,4*	*13,9*	*12,8*
Superficie radiante	cm²	**292**	317	317	**292**
Sup. radiante specifica	cm²/W	*24,3*	*25,6*	*22,8*	*22,8*

eguali fra di loro e in totale assommano ai 12 W da noi stabiliti: per il secondo tipo sono diverse fra di loro e il loro totale è leggermente più alto: 12,4 W.

Quanto ai prezzi, e questo è ciò che più ci importa, il nuovo progetto è risultato più caro di quello fatto in base alle formule del minimo costo: il che conferma l'esattezza di esse.

Dobbiamo però, come al solito, fare alcune osservazioni. Esse sono:

1°) E' vero che calcolando con le formule abbiamo realizzato un risparmio, ma questo ammonta soltanto al 3,5 % ca., pur non avendo noi, nel calcolo empirico, particolarmente studiato la forma del lamierino ed il proporzionamento ferro-rame.

2°) Sebbene le perdite totali siano più alte nel trasformatore di colonna 2, è facile calcolare, come è stato fatto e posto in tabella, che la superficie dissipante calore è maggiore nel 2° tipo che non nel 1°, tanto che la superficie unitaria per ogni watt da dissipare è maggiore nel secondo tipo che risulta quindi meglio raffreddato.

3°) Se poi, come la pratica consiglia, nel secondo tipo avessimo adottato per J il valore usuale di 3 Amp/mm^2 anzichè quello di 2,18 sorto dal calcolo di minimo costo, si sarebbero avuti i risultati della colonna 3 che, in fatto di pura economia, battono quelli cosiddetti di minimo costo di ben il 10 %!! E' vero che in tal caso le perdite salgono a 13,9 W, ma la superficie dissipante unitaria risulta ancora di 22,8 cm^2/W che, stando ai dati stabiliti nel capitolo 10°, rientra ancora in una categoria di costruzioni ben dimensionate, senza tener conto che il minore ingombro del rame ci lascia ora un canale di più di 4 mm tra ferro e rame migliorando così le condizioni di raffreddamento rispetto a quelle dei precedenti due tipi. Vuole il caso che in questo terzo dimensionamento perdite ferro e perdite rame all'incirca si equivalgano, rispettando una delle condizioni di minor costo.

4°) Supposto ora che non si voglia assolutamente scendere al disotto del valore 22,8 cm^2/W nelle condizioni di raffreddamento, vediamo di aumentare, nel trasformatore già calcolato con le formule di minimo costo, la corrente specifica nel rame fintantochè si raggiunga la condizione anzidetta posta come limite. Dopo qualche tentativo, giungiamo ai risultati elencati nella colonna 4. Notiamo subito: primo, che abbiamo ancora un risparmio, sebbene leggero (1 %) rispetto alla 3ª colonna, pur avendo eguali condizioni di raffreddamento; secondo, che non abbiamo perduto nulla circa la caduta di tensione, proporzionale come sappiamo alle perdite nel rame, essendo le perdite rame nel caso 3° e 4° esattamente eguali; terzo, che anche in questo ultimo dimensionamento abbiamo un canale d'aria tra ferro e rame, giovevole sia per il raffreddamento che per l'isolamento verso massa; quarto, le minori perdite totali di questo tipo rispetto al 3° assicurano un miglior rendimento del trasformatore.

Conclusioni.

E' giunto ora il momento di trarre le conclusioni della nostra fatica, relativamente alla utilità delle formule per il minimo costo.

Appoggerò le mie considerazioni sui risultati degli esempi precedentemente svolti. Si è visto come le formule matematiche, e non vi poteva essere dubbio su questo, diano effettivamente dei dati costruttivi più economici di qualunque altro progetto in cui si tengano gli stessi dati di sollecitazione dei materiali: si è però constatato che la necessaria interdipendenza dei valori di B_m ed J limita notevolmente la praticità dei risultati e come alcuni ritocchi nei valori delle sollecitazioni dei materiali, specie del rame, possano portare a risultati assai migliori. Abbiamo però d'altro canto constatato che, lavorando sulla base di un pacco lamellare già calcolato con i concetti del minimo costo, questo lavoro di aggiustamento riesce notevolmente abbreviato, in quanto si parte da condizioni già soddisfacenti per quanto riguarda il miglior rapporto risultati tecnici/fattore economico.

Va tenuto presente che la teoria del calcolo riesce molto più adatta alle grandi costruzioni che non ai piccoli trasformatori di cui ci occupiamo e che l'applicazione ad essi è stata fatta più per trarne orientamenti generali che per definire rigidamente un sistema di calcolo. E questi orientamenti noi li abbiamo avuti, soprattutto con i due risultati base già accennati: necessità, per il minimo costo, di avere perdite nel ferro e nel rame eguali fra di loro; convenienza di un nucleo a sezione rettangolare di rapporto lati circa 2.

Questo è già molto importante per noi e può giustificare il tempo per cui abbiamo considerato il problema. Tenuto conto di queste condizioni di optimum e della normale pratica di progetto, personalmente consiglio, quando ne sia il caso, di procedere per un progetto di massima economia secondo lo schema seguente:

1°) Eseguire il calcolo di minimo costo secondo il procedimento segnalato.

2°) In base ai risultati ottenuti correggere i dati fissati in partenza con approssimazione e riprendere il calcolo con i nuovi in modo da assicurarsi che i risultati definitivi non siano falsati da presupposti non conformi alla realtà.

3°) Esaminare la possibilità di aumentare la corrente specifica (è sempre questo dato, in genere, ad essere troppo basso, a meno che non si presumano forti perdite specifiche nel ferro impiegato) ad un valore tale che la dissipazione del calore gene-

rato dalle perdite sia assicurata con un certo margine rispetto alla qualità ed al rendimento che si desidera realizzare nel trasformatore.

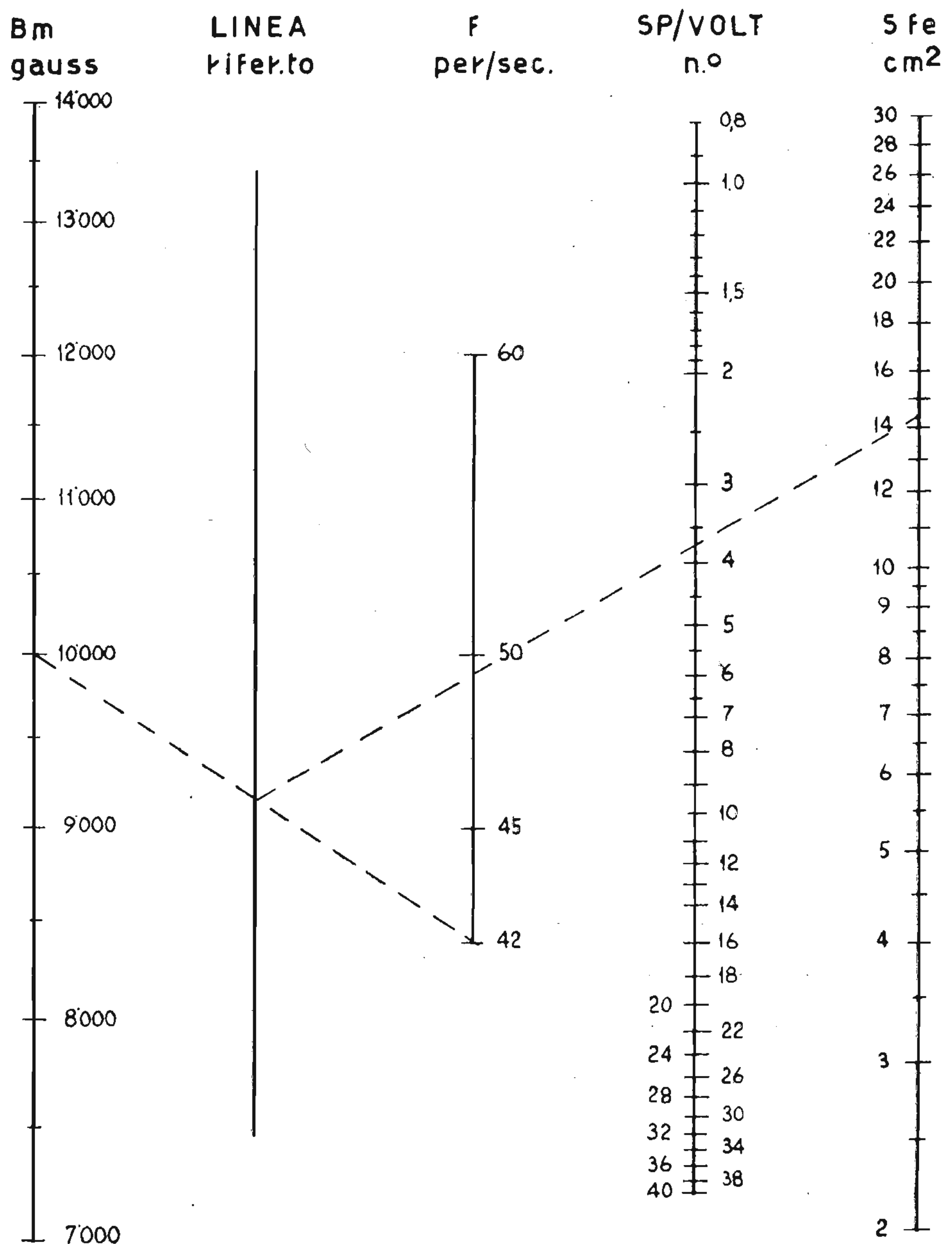
4°) Se ciò facendo, l'avvolgimento si rimpiccolisse al punto tale da lasciare un discreto spazio fra l'esterno di questi e il ferro, non si ritocchino i dati del lamierino a meno che tale spazio non sia effettivamente eccessivo, ricordando che un avvolgimento « non impiccato » eviterà sgradevoli sorprese durante la produzione causate da maggiorazioni impreviste nell'isolamento (maggiore spessore della smaltatura del filo, maggiore spessore della carta, scarsa abilità di un avvolgitore, ecc.) ed eviterà anche scarti al collaudo per deficiente isolamento. Inoltre questo canale di aria, pur non potendo essere messo in conto per il raffreddamento specie in trasformatori chiusi con calotte, ha pur sempre una qualche benefica influenza in questo senso.

Io ritengo che un avveduto calcolatore possa trarre da queste formule e da questi orientamenti la possibilità di ridurre il costo dei trasformatori progettati, pur mantenendo una certa linea di qualità.

L'entità del risparmio non è facile da prevedere, dipendendo essa dall'abilità dell'operatore e dalle circostanze del progetto, ma non credo di andare molto errato pensando che parecchi dei trasformatori del commercio possano vedere il loro costo ridotto dal 5 al 10 % senza che la loro temperatura a regime aumenti di un solo grado.

Provare, costa poco.

DATI TABELLARI



I - NOMOGRAMMA PER IL CALCOLO DEL NUMERO DI SPIRE/VOLT

Impiego: sulle linee B_m ed f si prendono i punti corrispondenti all'induzione e frequenza prescelte. Si uniscono i detti punti con un segmento. Si collega in seguito il punto di intersezione così determinatosi sulla linea di riferimento con il punto corrispondente alla sezione netta del pacco preso sulla linea S_{fe}. Il punto di intersezione di questo secondo segmento con la linea SP/VOLT determina il valore cercato. L'esempio con linee tratteggiate sul diagramma si riferisce al calcolo eseguito al Cap. 11.

	Tensione primarie e rapporti sezione rame										k_p
V_p			0	125	160						1,22
S_n/S_1			*1*	*0,78*							
V_p			0	125	140	160					1,23
S_n/S_1			*1*	*0,89*	*0,78*						
V_p			0	125	160	220					1,49
S_n/S_1			*1*	*0,78*	*0,57*						
V_p			0	125	140	160	220				1,50
S_n/S_1			*1*	*0,89*	*0,78*	*0,57*					
V_p			0	125	140	160	220	280			1,72
S_n/S_1			*1*	*0,89*	*0,78*	*0,57*	*0,45*				
V_p			0	125	140	160	220	250	280		1,73
S_n/S_1			*1*	*0,89*	*0,78*	*0,57*	*0,50*	*0,45*			
V_p			0	110	125	140	160				1,35
S_n/S_1			*1*	*0,88*	*0,78*	*0,62*					
V_p			0	110	125	140	160	220			1,62
S_n/S_1			*1*	*0,88*	*0,78*	*0,62*	*0,50*				
V_p			0	110	125	140	160	220	280		1,84
S_n/S_1			*1*	*0,88*	*0,78*	*0,62*	*0,50*	*0,39*			
V_p			0	110	125	140	160	220	250	280	1,85
S_n/S_1			*1*	*0,88*	*0,78*	*0,62*	*0,50*	*0,44*	*0,39*		
V_p			0	125	160	220	280				1,71
S_n/S_1			*1*	*0,78*	*0,57*	*0,45*					
V_p			0	220	280						1,22
S_n/S_1			*1*	*0,78*							
V_p			0	220	250	280					1,23
S_n/S_1			*1*	*0,88*	*0,78*						
V_p			0	110	220						1,50
S_n/S_1			*1*	*0,50*							
V_p		10	0	110	130	150	220				1,69
S_n/S_1		*0,92*	*1*	*0,85*	*0,73*	*0,50*					
V_p		10	0	110	130	150	220	240	270		1,88
S_n/S_1		*0,92*	*1*	*0,85*	*0,73*	*0,50*	*0,46*	*0,41*			
V_p	20	10	0	100	130	160	220				1,86
S_n/S_1	*0,83*	*0,91*	*1*	*0,77*	*0,63*	*0,45*					
V_p	20	10	0	100	130	160	220	260			2,02
S_n/S_1	*0,83*	*0,91*	*1*	*0,77*	*0,63*	*0,45*	*0,39*				
V_p	20	10	0	120	150	210					1,63
S_n/S_1	*0,86*	*0,92*	*1*	*0,80*	*0,57*						
V_p	20	10	0	110	140	220	260				1,89
S_n/S_1	*0,85*	*0,92*	*1*	*0,78*	*0,50*	*0,42*					
V_p		15	0	15	145	235					1,61
S_n/S_1		*0,81*	*0,90*	*1*	*0,59*						
V_p		15	0	15	145	235	280				1,78
S_n/S_1		*0,81*	*0,90*	*1*	*0,59*	*0,49*					
V_p		15	0	15	125	165	220	265			1,94
S_n/S_1		*0,78*	*0,88*	*1*	*0,73*	*0,54*	*0,44*				

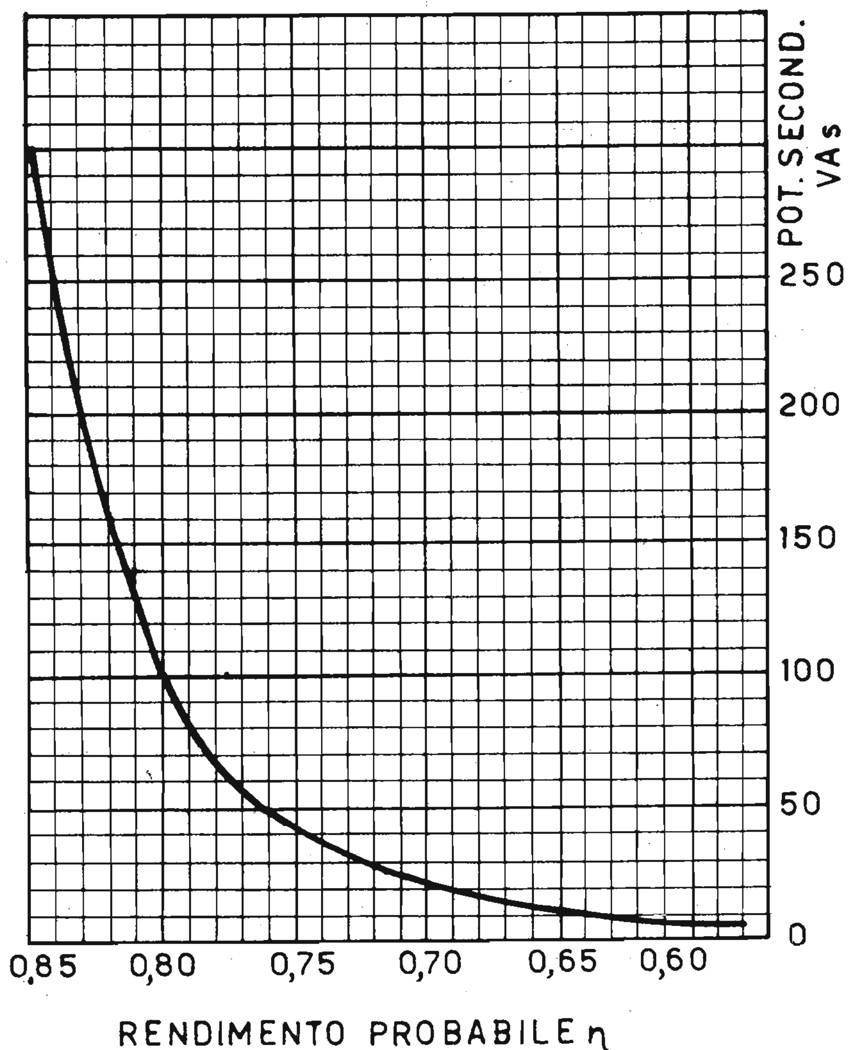
RAPPORTI FRA LE SEZIONI DEL RAME NELLE VARIE ZONE DI AVVOLGIMENTO PER PRIMARI A PRESE MULTIPLE E RELATIVI COEFFICIENTI D'INGOMBRO

TABELLA II A - *DATI PER CALCOLO A CORRENTE SPECIFICA COSTANTE*

k_p	*Tensione primarie e rapporti sezioni rame*	
1,12	0 125 160 *1 0,44*	V_p S_n/S_1
1,12	0 125 140 160 *1 0,47 0,42*	V_p S_n/S_1
1,28	0 125 160 220 *1 0,44 0,33*	V_p S_n/S_1
1,28	0 125 140 160 220 *1 0,47 0,42 0,33*	V_p S_n/S_1
1,40	0 125 140 160 220 280 *1 0,47 0,42 0,33 0,25*	V_p S_n/S_1
1,40	0 125 140 160 220 250 280 *1 0,47 0,42 0,33 0,27 0,23*	V_p S_n/S_1
1,19	0 110 125 140 160 *1 0,47 0,41 0,37*	V_p S_n/S_1
1,35	0 110 125 140 160 220 *1 0,47 0,41 0,37 0,29*	V_p S_n/S_1
1,47	0 110 125 140 160 220 280 *1 0,47 0,41 0,37 0,29 0,22*	V_p S_n/S_1
1,47	0 110 125 140 160 220 250 280 *1 0,47 0,41 0,37 0,29 0,23 0,21*	V_p S_n/S_1
1,40	0 125 160 220 280 *1 0,44 0,33 0,25*	V_p S_n/S_1
1,12	0 220 280 *1 0,44*	V_p S_n/S_1
1,12	0 220 250 280 *1 0,47 0,41*	V_p S_n/S_1
1,33	0 110 220 *1 0,33*	V_p S_n/S_1
1,39	10 0 110 130 150 220 *0,48 1 0,46 0,39 0,30*	V_p S_n/S_1
1,49	10 0 110 130 150 220 240 270 *0,48 1 0,46 0,39 0,30 0,24 0,22*	V_p S_n/S_1
1,48	20 10 0 100 130 160 220 *0,44 0,48 1 0,43 0,35 0,26*	V_p S_n/S_1
1,57	20 10 0 100 130 160 220 260 *0,44 0,48 1 0,43 0,35 0,26 0,21*	V_p S_n/S_1
1,36	20 10 0 120 150 210 *0,44 0,48 1 0,44 0,33*	V_p S_n/S_1
1,51	20 10 0 110 140 220 260 *0,44 0,48 1 0,44 0,31 0,23*	V_p S_n/S_1
1.36	15 0 15 145 235 *0,43 0,47 1 0,37*	V_p S_n/S_1
1,46	15 0 15 145 235 280 *0,43 0,47 1 0,37 0,27*	V_p S_n/S_1
1,52	15 0 15 125 165 220 265 *0,42 0,47 1 0,42 0,31 0,24*	V_p S_n/S_1

RAPPORTI FRA LE SEZIONI DEL RAME NELLE VARIE ZONE DI AVVOLGIMENTO PER PRIMARI A PRESE MULTIPLE E RELATIVI COEFFICIENTI D'INGOMBRO

TABELLA II B - *DATI PER IL CALCOLO A DISSIPAZIONE TOTALE COSTANTE*

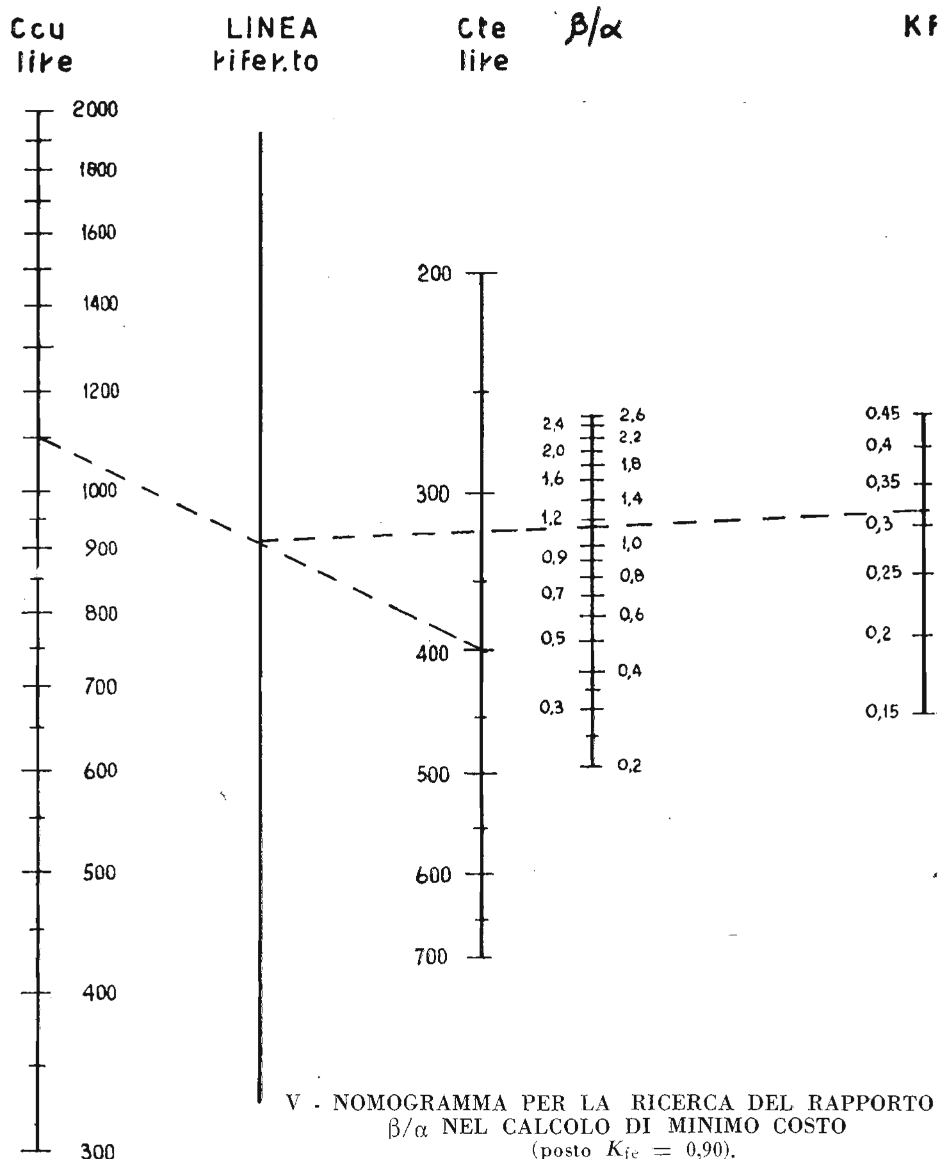


IV - DIAGRAMMA DEL RENDIMENTO PROBABILE DI UN TRASFORMATORE IN FUNZIONE DELLA SUA POTENZA

Nota: Il rendimento indicato dal diagramma si riferisce ad una media relativa a costruzioni ben dimensionate. Per costruzioni più sfruttate il rendimento è naturalmente minore.

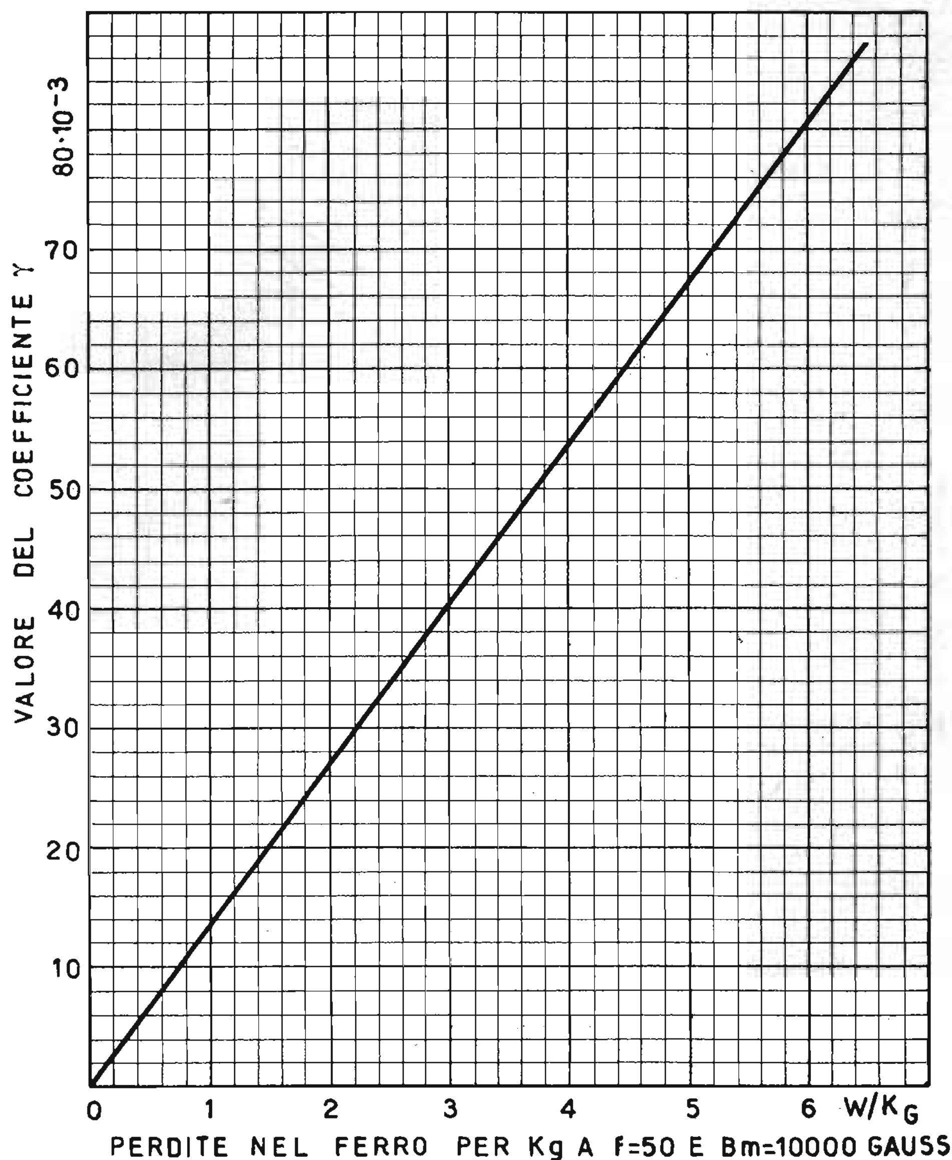
Diametro mm.	Sezione mm^2	Corrente ammessa in mA per:				
		$J = 2$	$J = 2,5$	$J = 3$	$J = 3,5$	$J = 4$
0,05	0,00195	3,9	4,9	5,8	6,8	7,8
0,06	0,0028	5,6	7	8,4	9,8	11,2
0,07	0,00385	7,7	9,6	11,6	13,5	15,4
0,08	0,005	10	12,5	15	17,5	20
0,09	0,0063	12,6	15,8	18,9	22	25,2
0,10	0,0078	15,6	19,5	23,5	27,4	31,2
0,11	0,0094	18,8	23,5	28,2	33	37,6
0,12	0,0112	22,4	28	33,5	39,1	44,8
0,13	0,0132	26,4	33	39,5	44,8	52,8
0,14	0,0153	30,6	38,2	46	53,6	61,2
0,15	0,0176	35,2	44	52,8	61,5	70,4
0,16	0,02	40	50	60	70	80
0,17	0,0226	45	56	68	79	90
0,18	0,0253	51	63	76	89	102
0,20	0,0314	63	78	94	110	126
0,22	0,038	76	95	114	133	152
0,25	0,049	98	122	147	172	196
0,28	0,061	122	152	183	213	243
		Corrente ammessa in Amp.				
0,30	0,07	0,14	0,175	0,21	0,245	0,280
0,32	0,08	0,16	0,20	0,24	0,280	0,320
0,35	0,096	0,192	0,24	0,288	0,366	0,384
0,38	0,113	0,226	0,282	0,338	0,395	0,452
0,40	0,125	0,25	0,312	0,375	0,437	0,500
0,45	0,16	0,32	0,40	0,48	0,560	0,640
0,50	0,195	0,39	0,488	0,585	0,682	0,780
0,55	0,237	0,474	0,59	0,71	0,83	0,948
0,60	0,28	0,56	0,70	0,84	0,98	1,12
0,65	0,33	0,66	0,83	0,99	1,16	1,32
0,70	0,385	0,77	0,96	1,16	1,35	1,54
0,75	0,44	0,88	1,10	1,32	1,54	1,76
0,80	0,50	1,00	1,25	1,5	1,75	2,0
0,85	0,565	1,13	1,41	1,7	1,98	2,26
0,90	0,63	1,26	1,58	1,89	2,21	2,52
0,95	0,71	1,42	1,78	2,13	2,49	2,84
1,00	0,78	1,56	1,95	2,35	2,74	3,12
1,10	0,94	1,88	2,35	2,82	3,3	3,76
1,20	1,12	2,24	2,8	3,35	3,91	4,48
1,30	1,32	2,64	3,3	3,95	4,48	5,28
1,40	1,53	3,06	3,82	4,6	5,36	6,12
1,50	1,76	3,52	4,4	5,28	6,15	7,04
1,60	2,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,00
1,70	2,26	4,52	5,6	6,8	7,9	9,04
1,80	2,53	5,06	6,3	7,6	8,9	10,1
2,00	3,14	6,28	7,8	9,4	11,0	12,5
2,20	3,8	7,6	9,5	11,4	13,3	15,2
2,50	4,9	9,8	12,2	14,7	17,2	19,6
2,80	6,1	12,2	15,2	18,3	21,3	24,4
3,00	7,0	14,0	17,5	21,0	24,5	28,0

TABELLA III - *SEZIONI DEI FILI DI RAME E CORRENTI CORRISPONDENTI ALLE VARIE CORRENTI SPECIFICHE DI LAVORO*



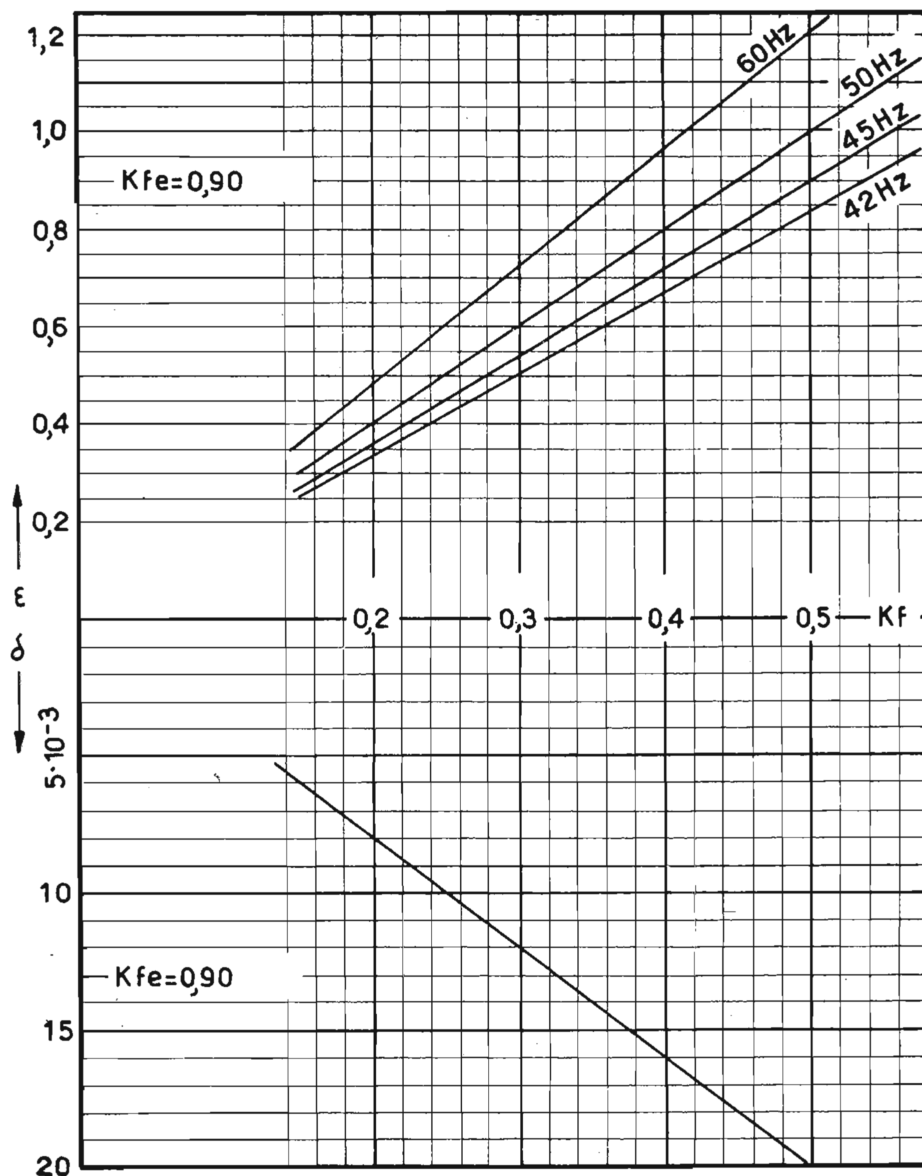
V - NOMOGRAMMA PER LA RICERCA DEL RAPPORTO β/α NEL CALCOLO DI MINIMO COSTO (posto $K_{fe} = 0{,}90$).

Impiego: Sulle linee C_{cu} e C_{fe} si prendono i punti corrispondenti rispettivamente al costo del rame e del ferro posti come base per il calcolo. Si uniscono i detti punti con un segmento. Si collega in seguito il punto di intersezione così determinatosi sulla linea di riferimento con il punto corrispondente al coefficiente di utilizzazione finestra preso sulla linea k_f. Il punto di intersezione di questo secondo segmento con la linea β/α determina il valore cercato. L'esempio con linee tratteggiate nel diagramma si riferisce al calcolo eseguito nell'appendice.



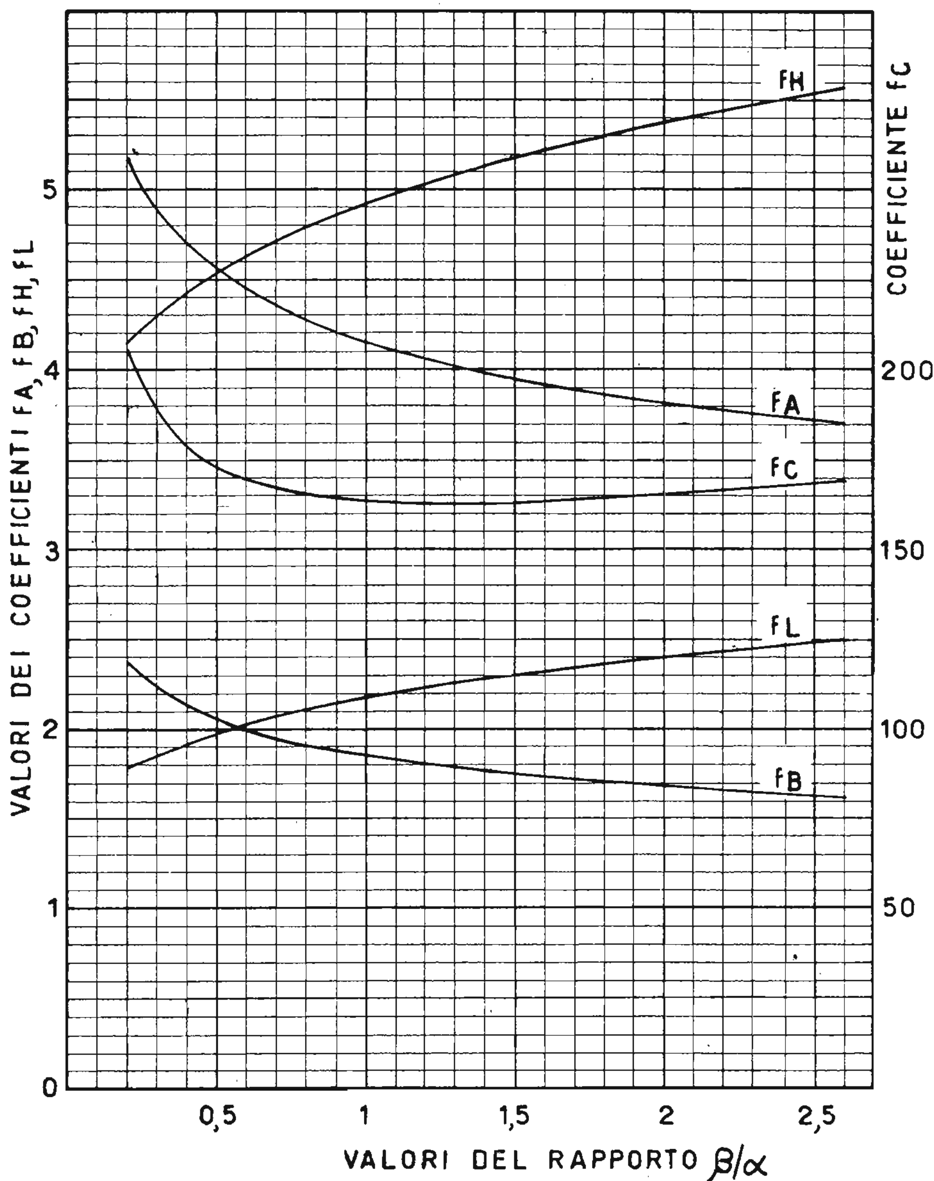
VI - DIAGRAMMA PER LA DETERMINAZIONE DEL VALORE γ NEL CALCOLO DI MINIMO COSTO.

Impiego: Nota la cifra delle perdite nel ferro reali (vedi osservazioni a questo riguardo al Cap. 10°) si determina con il diagramma il coefficiente γ richiesto dal calcolo di minimo costo; si noti che tutte le cifre in ordinata sono affette dal coefficiente 10^{-3}.



VII . DIAGRAMMA PER LA DETERMINAZIONE DI δ ED ε NEL CALCOLO DI MINIMO COSTO

Impiego: il coefficiente δ si determina nella parte inferiore del diagramma in funzione del coefficiente k_f presunto; il coefficiente ε si determina nella parte superiore, pure in funzione di k_f scegliendo come retta di riferimento quella corrispondente alla frequenza di progetto.



VIII - DIAGRAMMA PER LA RICERCA DELLE FUNZIONI f_A, f_B, f_H, f_L, f_C NEL CALCOLO DI MINIMO COSTO.

Impiego: noto il valore del rapporto β/α si trovano sul diagramma i valori di f_A, f_B, f_H, f_L (graduazione sull'ordinata di sinistra) e di f_C (graduazione sull'ordinata di destra) riferendosi per ciascun valore alla curva relativa.

INDICE

I N D I C E

21 - Dr. Ing. Enrico Baldoni - I Trasformatori

LIRE NOVECENTO

C.M.R

Baldoni i trasformatori

21